



Sara Sofia Moutinho Leonardo

Licenciada em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

Identificação e modelação das variáveis que afetam uma mistura que passa de fluido newtoniano para fluido não newtoniano

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química e Bioquímica

Orientador: António Alegria da Cunha, Engenheiro
Mecânico, GEO – Ground Engineering Operations

Co-orientador: José Paulo Mota, Professor Catedrático,
FCT-UNL

Presidente: Prof. Doutora Maria Madalena Alves Campos de Sousa Dionísio
Andrade, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Vogal(ais): Prof. Doutor Mário Fernando José Eusébio, Professor Auxiliar, FCT-
UNL; Engenheiro António Alegria da Cunha, Engenheiro Mecânico, GEO-
Ground Engineering Operations



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2017



Sara Sofia Moutinho Leonardo

Licenciada em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

Identificação e modelação das variáveis que afetam uma mistura que passa de fluido newtoniano para fluido não newtoniano

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química e Bioquímica

Orientador: António Alegria da Cunha, Mestre, GEO –
Ground Engineering Operations

Co-orientador: José Paulo Mota, Professor Catedrático,
FCT-UNL

Presidente: Prof. Doutora Maria Madalena Alves Campos de Sousa Dionísio
Andrade, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Vogal(ais): Prof. Doutor Mário Fernando José Eusébio, Professor Auxiliar, FCT-
UNL; Engenheiro António Alegria da Cunha, Engenheiro Mecânico, GEO-
Ground Engineering Operations



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2017

“Identificação e modelação das variáveis que afetam uma mistura que passa de fluido newtoniano para fluido não newtoniano”

Copyright © Sara Sofia Moutinho Leonardo, FCT/UNL, FCT

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“It does not matter how slowly you go as long as you do not stop”

Confucius

AGRADECIMENTOS

Na realização da presente tese de mestrado, contei com o apoio de numerosas pessoas, pessoas que são e se tornaram importantes durante a realização deste projeto, querendo deixar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu Orientador da GEO, Engenheiro António Cunha, pelas suas ideias, pela paciência, pela energia positiva transmitida, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou.

Ao meu Orientador da FCT, Professor José Paulo Mota, pelos conselhos dados.

À Doutora Telma Barroso, pelo seu exemplo de liderança, pelo seu incentivo, pela sua paciência, ideias e seus conselhos.

Aos meus colegas da GEO, Stéphanie Leal, Leandro Parada, André Praça e Jorge Capitão-Mor, pela boa disposição, conselhos e apoio.

Ao colega António Tavares, pela partilha de conhecimento e ajuda durante todas as fases deste projeto.

Às minhas colegas Daniela Pequito e Catarina Rodrigues, pela força que sempre me deram para nunca desistir, pela compreensão, pelos risos e partilha de ideias e conhecimento.

Não poderia deixar de agradecer à minha família em especial aos meus pais, por todo o carinho e amor, por todo o apoio que sempre me deram durante o meu percurso académico bem como, à elaboração da presente tese.

Ao meu namorado por ter caminhado ao meu lado, pela paciência, amor, por não me ter deixado desistir e ver algo bom em todas as dificuldades apresentadas.

A todos um Muito Obrigada.

ABSTRACT

The development of this project focuses on the study of a long-air mixing system - Pulse Air System - in the use of polymer mixing. The objective of this project is to identify and parameterize the variables that affect a mixture from newtonian to non-newtonian fluid through the use of the Pulse Air system in a cylindrical tank 2160 mm in diameter and 2000 mm in height. To be able to generate a polymeric fluid that is capable of reaching 90 s/quart in less than 30 minutes, which is homogeneous, valid in the pH range between [11,12] and using a ratio of 1 g polymer / L of tap water. The polyGeo is the polymer used in this project.

To reach the objectives, the following variables were studied: number of plates and TOff (time of stopping the pulse) on a laboratory scale - Mini Silo. Two combinations of accumulator plates, one of 100 mm in diameter and four of 40 mm diameter accumulator plates, were obtained for Pulse Air, TOn (time of the pulse), TOff and Pressure operating parameters: 0,1 seconds, 3 seconds and 3,5 bar, respectively, using an accumulator plate of 100 mm in diameter, the accomplishment of the objective in laboratory scale, for these were the parameters considered in the scale up study.

It was also performed through mathematical modeling comparisons of bubble rise velocity between the Pulse Air system and computational simulations. It was, however, understood that the simulation carried out allowed a more visual than quantitative approach to the currents caused by the rise of the bubble.

For the Scale up, the operating conditions of the Pulse Air used in the Mini Silo were used, which allowed a viscosity of 92 s/quart. However, the maximum viscosity obtained was only allowed for the operating conditions of TOn, TOff and Pressure of 0.1 seconds, 2 seconds and 3.5 bar, respectively being possible to obtain 82 s / quarter of viscosity with a standard deviation range outside of the established for a homogeneous fluid ($[0;0,3]$ ml/s), that is 0,62 ml/s, not accomplishing the proposed objective.

Key-words: Pulse Air System; polimeric mixing, parametrization, mathematical modeling, scale up, bubble rise velocity

RESUMO

O desenvolvimento deste projeto centra-se no estudo de um sistema de mistura a ar comprimido - Sistema Pulse Air - na aplicação de misturas poliméricas. O objetivo proposto para este projeto passa por através da modelação matemática identificar e parametrizar as variáveis que afetam uma mistura que passa de fluido newtoniano a não newtoniano, através da utilização do sistema Pulse Air num tanque cilíndrico com 2160 mm de diâmetro e 2000 mm de altura de forma a conseguir gerar um fluido polimérico que seja capaz de atingir 90 s/quarto em menos de 30 minutos, que seja homogêneo, válido no intervalo de pH entre [11,12] e utilizando um rácio de 1 g polímero/ L de água da torneira, sendo o polyGEO, o polímero utilizado neste projeto.

Para atingir os objetivos foram estudadas as variáveis: números de pratos e TOff (tempo de paragem do pulso de ar) numa escala laboratorial – Mini Silo. Foram estudadas duas combinações de pratos acumuladores, um de 100 mm de diâmetro e 4 pratos acumuladores de 40 mm de diâmetro e foram obtidos para os parâmetros operacionais do Pulse Air, TOn (tempo de pulso de ar), TOff e Pressão do sistema Pulse Air: 0,1 segundos, 3 segundos e 3,5 bar, respetivamente, utilizando um prato acumulador de 100 mm de diâmetro, o cumprimento do objetivo em escala laboratorial, pelo que foram esses os parâmetros considerados no estudo do scale up.

Foram também realizadas, através da modelação matemática, comparações de velocidade de subida da bolha entre o sistema Pulse Air e as simulações computacionais. Foi, no entanto, entendido que as simulações realizadas permitiram uma abordagem mais visual que quantitativa das correntes de fluido provocadas pela subida da bolha.

Para a realização do Scale up, foram utilizadas as condições operacionais do Pulse Air utilizadas no Mini Silo, que permitiram obter uma viscosidade de 92 s/quarto. No entanto a máxima viscosidade obtida apenas foi permitida para as condições operacionais de TOn, TOff e Pressão de 0,1 segundos, 2 segundos e 3,5 bar, respetivamente sendo possível obter 82 s/quarto de viscosidade com um intervalo de desvio padrão fora do estabelecido para um fluido homogêneo ($[0;0,3]$ ml/s), ou seja 0,62 ml/s, não sendo cumprido o objetivo proposto.

Palavras-chave: Sistema Pulse Air; misturas poliméricas, parametrizar, modelação matemática, scale up, velocidade de subida das bolhas

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 POLÍMEROS	1
1.1.1 <i>Polímeros de elevado peso molecular solúveis em água</i>	2
1.1.1.1 Propriedades Reológicas de polímeros de elevado peso molecular solúveis em água	3
1.1.1.2 Dissolução de polímeros de elevado peso molecular solúveis em água	8
1.1.1.2.1 Molhagem	9
1.1.1.2.2 Dispersão e hidratação	10
1.2 SISTEMAS DE MISTURA	11
1.2.1 <i>Sistema de mistura por agitação mecânica</i>	12
1.2.2 <i>Sistemas de mistura por jatos</i>	18
1.2.3 <i>Sistemas de mistura por ar comprimido</i>	19
1.2.3.1 Sistema Pulsair	20
1.3 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	23
1.3.1 <i>Simulação de escoamento multifásico</i>	24
2. OBJETIVOS	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	29
3.2 MÉTODOS	29
3.2.1 <i>Mini Silo – Escala Laboratorial</i>	29
3.2.1.1 Experimentais	29
3.2.1.1.1 Estudo da variação da viscosidade em função da concentração do polímero em água utilizando o Pulse Air	29
3.2.1.1.2 Estudo da variável TOff do Sistema Pulse Air para um tanque de menores dimensões (200x600) mm	30
3.2.1.1.2.1 1 Prato de acumulação de 100 mm de diâmetro	31
3.2.1.1.2.2 4 Pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro	32
3.2.1.1.3 Estudo da Influência da temperatura na viscosidade e homogeneidade de uma mistura polimérica	34
3.2.1.1.3.1 1 Prato de acumulação de 100 mm de diâmetro	34
3.2.1.1.3.2 4 Pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro	35
3.2.1.1.4 Estudo da velocidade de subida de uma bolha	35
3.2.1.1.5 Medição da viscosidade	35
3.2.1.1.6 Determinação da homogeneidade	36
3.2.1.1.7 Análise de sais presentes na água	36
3.2.1.1.8 Determinação das constantes da lei da potência	37
3.2.1.2 Simulações	38
3.2.1.2.1 Comparação de modelos multifásicos e turbulência na simulação	38
3.2.1.2.2 Simulação CFD de uma bolha de ar em 3D com superfície livre	38
3.2.1.2.3 Simulação CFD de 4 bolhas de ar em 3D com superfície livre	40

3.2.2	<i>Scale Up</i>	42
3.2.2.1	Experimental	42
3.2.2.1.1	Validação Experimental de um Sistema Pulse Air para um tanque de (2160x2000) mm utilizando um prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro	42
3.2.2.2	Simulações.....	44
4.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	45
4.1	MINI SILO – ESCALA LABORATORIAL.....	45
4.1.1	<i>Resultados Experimentais</i>	45
4.1.1.1	Viscosidade versus variação da concentração de polímero	45
4.1.1.2	Variável Toff.....	47
4.1.1.2.1	1 Prato de 100 mm de diâmetro.....	47
4.1.1.2.2	4 Pratos de 40 mm de diâmetro.....	48
4.1.1.3	Influência da temperatura na viscosidade e homogeneidade de uma mistura polimérica 49	
4.1.1.4	Velocidade de subida de uma bolha de ar	50
4.1.1.5	Constantes da lei da potência k e n	52
4.1.2	<i>Resultados das Simulações</i>	55
4.1.2.1	Comparação modelos de turbulência.....	55
4.1.2.2	Simulação CFD uma bolha de ar	57
4.1.2.3	Simulação CFD de 4 bolhas de ar	59
4.1.2.4	Comparação das velocidades de subida das bolhas computacional e experimental.....	62
4.2	SCALE UP.....	64
4.2.1	<i>Resultados Experimentais</i>	64
4.2.1.1	Validação Experimental de um sistema Pulse Air utilizando um prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro	64
4.2.2	<i>Resultados das Simulações</i>	66
5.	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
	ANEXO A	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 modelo das duas placas	4
Figura 1.2 Variação da viscosidade em função do tempo para fluidos reopéticos e tixotrópicos	5
Figura 1.3 Variação da viscosidade em função da taxa de deformação angular para fluidos newtonianos e não newtonianos	6
Figura 1.4 Medidores de viscosidade do tipo capilar, Stokes, rotativo e de Marsh	7
Figura 1.5 Dimensões do funil e cone de Marsh	7
Figura 1.6 Representação esquemática das três etapas da dissolução dum polímero em água	9
Figura 1.7 Tecnologia SLIM	10
Figura 1.8 Impulsores de fluxo axial de três pás, JT2 e helicoidal	12
Figura 1.9 Impulsores de fluxo radial de Rushton, âncora e Smith	13
Figura 1.10 Esquema de um agitador, montado num tanque cilíndrico com o eixo de rotação vertical e na linha central do tanque	13
Figura 1.11 Esquema ilustrativo da invenção, aplicada a um sistema contínuo	14
Figura 1.12 Esquema ilustrativo (vista lateral da invenção)	14
Figura 1.13 Esquema ilustrativo da invenção	15
Figura 1.14 Esquema ilustrativo de um edutor	15
Figura 1.15 Representação de uma pá para fluídos de elevada viscosidade	16
Figura 1.16 Vista lateral do impulsor da invenção	16
Figura 1.17 Ilustração esquemática da invenção	17
Figura 1.18 Ilustração esquemática do impulsor da invenção	17
Figura 1.19 Esquema ilustrativo de uma montagem do sistema misturador a jatos	18
Figura 1.20 misturador Blendcon® Air Blender	19
Figura 1.21 a) placas acumuladoras; b) placas distribuídas no fundo do tanque	20
Figura 1.22 Movimentação da bolha através do sistema Pulsair	21
Figura 1.23 Desenho do crescimento da bolha mostrando o R_{pulso}	22
Figura 3.1 a) Prato de acumulação de 100 mm; b) tanque cilíndrico em acrílico de 200x600 mm; c) prato de acumulação de 40 mm	31
Figura 3.2 Tanque de 200x600 mm com prato de acumulação de 100 mm de diâmetro	31
Figura 3.3 Tanque de 200x600 mm com 4 pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro	33
Figura 3.4 Medição da viscosidade utilizando o funil e copo de Marsh	36
Figura 3.5 a) Fitas de carbonato de cálcio; b) fitas de cloro	37
Figura 3.6 Prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro instalado no fundo do tanque	42
Figura 3.7 Line-Vac's utilizados	43
Figura 3.8 Zonas de tiragem de amostras no tanque de scale-up	43
Figura 4.1 Representação gráfica dos valores de viscosidade experimental e calculada em função da concentração de polímero em água	46
Figura 4.2 Comparação de resultados de viscosidade e temperaturas para 1 e 4 pratos acumuladores	50

Figura 4.3 Sistema Pulse Air com libertação de bolhas	51
Figura 4.4 Representação gráfica da velocidade em função do volume de bolha com água e água + PolyGEO	52
Figura 4.5 Comportamento dos fluidos de acordo com a viscosidade versus taxa de deformação angular.....	52
Figura 4.6 Representação gráfica do logaritmo da viscosidade (Pa.s) em função do logaritmo da taxa de deformação angular (s^{-1})	54
Figura 4.7 Comparação dos modelos das simulações	55
Figura 4.8 Representação de volume dos contornos de velocidade para a simulação de uma bolha de ar de 62 mm de raio num fluido newtoniano	57
Figura 4.9 Representação gráfica de contornos e vetores de uma bolha de 62 mm de raio em diferentes instantes	58
Figura 4.10 Representação gráfica das velocidades instantâneas para uma bolha num fluido newtoniano e não newtoniano.....	59
Figura 4.11 Representação de volume dos contornos de velocidade para a simulação de 4 bolhas de ar de 34 mm de raio num fluido newtoniano	60
Figura 4.12 Representação gráfica de contornos e vetores de duas bolhas	61
Figura 4.13 Representação gráfica das velocidades instantâneas da bolha 1 num fluido newtoniano e não newtoniano.....	62
Figura 4.14 Representação gráfica da comparação de velocidade de subida da bolha em função do volume da bolha para água / fluido newtoniano e água+polyGEO/ fluido não newtoniano ..	63
Figura 4.15 Zonas de tiragem de amostras no tanque	64
Figura 4.16 Concentração de polímero no fundo do tanque e remoção do polímero colado ao fundo do tanque.....	65
Figura 4.17 Representação gráfica de contorno e vetores da velocidade	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Ensaio para avaliação da viscosidade versus concentração de polímero	30
Tabela 3.2 Ensaios de controlo realizados no sistema Pulse Air para um prato com diâmetro de 100mm, variando o TOff e a Pressão do ar	32
Tabela 3.3 Ensaios realizados com água da torneira para um prato com diâmetro de 100 mm, variando o TOff e pressão do ar.....	32
Tabela 3.4 Ensaios de controlo realizados no sistema Pulse Air para 4 pratos com diâmetro de 40 mm, variando o TOff e a Pressão do ar	33
Tabela 3.5 Ensaios realizados com água da torneira para 4 pratos com diâmetro de 40 mm, variando o TOff e pressão do ar.....	34
Tabela 3.6 Ensaio - sala climatizada para 1 prato de acumulação e água destilada.....	34
Tabela 3.7 Ensaio - sala climatizada para 4 pratos de acumulação de 40 mm e água destilada	35
Tabela 3.8 Parâmetros operacionais do sistema Pulse Air para o estudo da velocidade de subida de uma bolha.....	35
Tabela 3.9 Velocidade de rotação do Spindle ULA(0)	37
Tabela 3.10 Ensaios de simulação com comparação de modelos de turbulência	38
Tabela 3.11 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de uma bolha	39
Tabela 3.12 Parâmetros da lei da potência introduzidos no Fluent, para simular um fluido não newtoniano	39
Tabela 3.13 Ensaios de simulação para uma bolha 2D	40
Tabela 3.14 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de 4 bolhas	40
Tabela 3.15 Ensaios de simulação para 4 bolhas	41
Tabela 3.16 Ensaios de scale up realizados com água da torneira para 1 prato com diâmetro de 1080 mm, variando o TOff e pressão do ar	43
Tabela 3.17 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de uma bolha	44
Tabela 3.18 Ensaio de simulação para uma bolha	44
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios da viscosidade em função da concentração de polímero .	46
Tabela 4.2 Resultados para um TOff de 2 segundos, para água destilada e da torneira	47
Tabela 4.3 Resultados para um TOff de 3 segundos, para a água destilada e da torneira	47
Tabela 4.4 Resultados para um TOff=2 segundos, utilizando 4 pratos	48
Tabela 4.5 Resultados para um TOff de 3, 4 e 5 segundos, para água da torneira, utilizando 4 pratos.....	48
Tabela 4.6 Resultados obtidos pelo Engenheiro da GEO para uma temperatura do ar de 20°C	49
Tabela 4.7 Resultados obtidos na comparação dos valores de viscosidade e homogeneidade para uma temperatura de 19 e 25°C, para 1 e 4 pratos de acumulação.....	49
Tabela 4.8 Parâmetros operacionais para o estudo da velocidade de subida da bolha para 1 e 0,5 L de ar	50

Tabela 4.9 Resultados obtidos pelo viscosímetro de Brookfield	53
Tabela 4.10 Valores calculados através da aplicação do logaritmo da viscosidade e taxa de deformação angular	54
Tabela 4.11 Resultados das velocidades de subida da bolha pela utilização de diferentes modelos no Ansys Fluent para um fluido newtoniano e comparação com velocidade de subida da bolha para o sistema Pulse Air utilizando água	56
Tabela 4.12 Resultados das velocidades instantâneas nos instantes 0,5; 1 e 1,5 segundos para uma bolha num fluido newtoniano e não newtoniano	59
Tabela 4.13 Resultados das velocidades instantâneas nos instantes 0,5; 1 e 1,5 segundos para bolhas num fluido newtoniano e não newtoniano	61
Tabela 4.14 Resultados obtidos scale up para as condições do mini silo.....	64
Tabela 4.15 Viscosidades das amostras recolhidas no fundo e superfície no tanque de Scale up	65
Tabela 4.16 Resultados das velocidades instantâneas de subida da bolha e junto à parede do tanque para uma bolha de 307mm de raio	67

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

3D - três dimensões

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

Da - Dalton

LES – *Large Eddy Simulation*

MW – *Molecular Weight*

PFM – *Phase Field Method*

VOF – *Volume of Fluid*

SIMBOLOGIA

μ , viscosidade, s/quarto (segundos por quarto de galão)

ρ , densidade, kg/m³ (quilograma por metro cúbico)

C, caudal volumétrico, ml/s (mililitros por segundo)

m, massa, g (gramas)

T, temperatura, °C (grau Celsius)

t, tempo, s (segundos)

τ , tensão de corte, Pa (Pascal)

γ , taxa de deformação angular, s⁻¹

n , índice de comportamento do fluido, adimensional

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existe a necessidade de otimizar sistemas na área de mistura de polímeros de forma a minimizar tempos de mistura, desperdícios, perdas significativas na dissolução e acelerar processos, deste modo pode recorrer-se à utilização da modelação computacional que possibilita a solução de problemas de forma a dar respostas que permitam tratar um determinado problema de forma mais objetiva e numa escala temporal mais reduzida. A análise CFD é utilizada nas mais variadas áreas, desde a engenharia e tecnologia à biologia e saúde, através do desenvolvimento de modelos matemáticos que permitem estudar o comportamento de determinado fenómeno.

Na presente dissertação simular-se-á experimentalmente e através de um *software*, o comportamento de um polímero solúvel em água, quando misturado através de um sistema *Pulse Air*, assim com base no conhecimento adquirido será possível a execução do sistema em grande escala (*scale up*).

1.1 Polímeros

Em 1920, Hermann Staudinger, professor alemão de química orgânica, estudou as reações que formam macromoléculas a partir da repetição de moléculas mais pequenas, monómeros. Estas moléculas são unidas entre si através de ligações covalentes [1]. O estudo desenvolvido marcou em 1922, o início de uma nova Era conhecida por química macromolecular e que lhe valeu em 1953 o prémio Nobel da Química [2,3].

Os polímeros podem ser classificados de várias formas, no entanto a classificação mais óbvia é baseada na origem do polímero, ou seja, natural ou sintético. Os polímeros naturais são extraídos da natureza e são geralmente solúveis em água. Exemplos de polímeros naturais: a lã, o DNA, as proteínas, a seda, a borracha natural e a celulose. Por outro lado, os polímeros sintéticos são produzidos através de reações químicas (polimerizações), sofrendo processos de transformação de forma a serem obtidas as características desejadas [4,5]. Alguns exemplos de polímeros sintéticos são: o neopreno, o nylon, o poliestireno, o poliácrlonitrilo e poliácrlamida [6].

Em 1920 o aumento da procura por borracha natural levou ao aumento dos preços o que gerou a procura por um substituto sintético. Foi durante o ano de 1930 que Wallace Carothers, um químico e a sua equipa de investigadores da empresa americana DuPont, produziu, durante uma experiência de polimerização usando cloropreno, uma substância semelhante a uma borracha, que era mais resistente à água e aos óleos, ao calor e aos solventes que a borracha natural. Foi atribuído o nome comercial de “Dupreno” e o nome original foi substituído pelo termo genérico “neopreno” [7].

Ainda em 1930 foi criada uma alternativa sintética à seda, pelo grupo de investigadores da DuPont, Wallace Carothers e Julian Hill que através de uma reação entre o ácido adípico com a

hexametilenodiamina criaram uma fibra sintética que foi chamada de fibra 66 uma vez que cada monómero continha seis carbonos na sua estrutura. Formou uma fibra forte, elástica e em grande parte insolúvel, com uma temperatura de fusão relativamente elevada [8,9]. A DuPont produziu este material a que passou a chamar-se de nylon 6,6 [10].

Em 1935, a empresa química alemã I.G. Farben produziu o poliestireno e colocou no mercado. As peças moldadas de poliestireno tornaram-se comuns no mesmo ano. O poliestireno tem várias aplicações que incluem embalagens, utensílios descartáveis, brinquedos, produtos de construção [11,12].

Quase uma década depois, em 1941, um cientista da DuPont procurou melhorar o *rayon* (fibra semi-sintética obtida a partir da celulose [13]), por meio de uma solução, este material – poliacrilonitrilo- tem o nome comercial de *Orlon* [14]. As suas principais aplicações são na indústria têxtil, na fabricação de tapetes, peluches, roupas, entre outros [15].

Em 1950 iniciou-se a “Era do Vinilo”, inicialmente produzida pelo químico alemão Eugen Baumann [16 -19], visto que muitas empresas começaram a produzir PVC (policloreto de vinilo) e os volumes produzidos aumentaram drasticamente em todo o mundo. Este material apresenta muitas aplicações, nomeadamente em embalagens, revestimentos de paredes, tecidos, revestimentos de interiores em automóveis, isolamento de fios, entre outros [20]. Ainda nesse ano, iniciou-se também a investigação da aplicação da poliacrilamida para o condicionamento do solo [21]. A poliacrilamida é um polímero produzido através da polimerização da acrilamida, onde esta é obtida pela reação de hidratação do acrilonitrilo. Tem a característica de ser solúvel em água e pode formar soluções aquosas de concentração muito elevada e por isso é utilizada em tratamentos de água [22], são conhecidos por hidrogéis e usados em eletroforese, que consiste numa técnica que separa moléculas através da indução de um campo elétrico [23]. Em 1961, Edwin Kolodny, descobriu uma forma de preparar a poliacrilamida para ser usada de forma a auxiliar a recuperação do petróleo [24]. Os polímeros à base de acrilamida são frequentemente utilizados como espessantes (substâncias que aumentam a viscosidade), estabilizadores, formadores de película, modificadores de reologia, emulsificantes, lubrificantes [25]. Por apresentar as características definidas anteriormente é um polímero muito usado na floculação e coagulação de sólidos em líquidos, sendo usado no tratamento de águas residuais como agente floculante químico [26-28]. São usados também como fluídos de estabilização, uma alternativa mais ecológica à bentonite [29-31].

1.1.1 Polímeros de elevado peso molecular solúveis em água

Ao longo da história dos polímeros de elevado peso molecular foram evidenciadas várias citações em artigos e patentes relativamente ao peso molecular dos polímeros. No ano de 1942, Arthur C. Skooglund e Clark Township [32], registaram uma patente de conteúdo relativo ao melhoramento de misturas de plásticos com elevado peso molecular superior a 30 000 Da. Em

1945, Robert M. Thomas, quando estudava um processo de polimerização de olefinas mencionou que um determinado polímero de elevado peso molecular teria 1000 Dalton [33]. Ainda no mesmo ano Gerry P. Marck [34], registou uma patente que referia polímeros de peso molecular na ordem dos 200 000 Da.

No ano de 1953, Calvin Everett Schildknecht [35], criou novos géis a partir de polímeros de vinilpirrolidona, que continham peso molecular superior a 360 000 Da, e passados 7 anos, em 1960, William Clarence Bedoit [36], registou a patente que considerava o método de preparação do polietileno glicol de elevado peso molecular de intervalo 6 000 a 8 000 Da. Entretanto no mesmo ano foi registada a patente [37] que referia o peso molecular do poli-isobutileno entre 80 000 a 300 000 Da. Já no ano de 1975, esse valor de peso molecular seria muito superior, estando num intervalo 10 000 a 1 milhão Da [38]. No ano de 1978, de acordo com Dae Song e seus colaboradores [39], os polímeros de elevado peso molecular apresentavam um peso molecular entre os 40 000 e valores muito superiores a 1 milhão Da, salientado que em 1986 também é referenciado o mesmo peso para polímeros de poliacrilamida de elevado peso molecular [40].

Em 1993, há registos de polímeros com elevado peso molecular entre 1 e 4 milhões Da [41]. No ano de 1997, de acordo com o autor da patente, os produtos de elevado peso molecular tinham um intervalo entre 1 milhão e 20 milhões Da [42].

Existem também autores que definem os polímeros de elevado peso molecular, como polímeros que apresentam um peso molecular superior a 10 000 Dalton ($MW > 10\,000\text{ Da}$) [43,44] e outros autores que definem $MW > 10$ milhões Da [25,45].

Os polímeros sintéticos solúveis em água são substâncias orgânicas que se dissolvem, dispersam ou incham em água e assim modificam as propriedades físicas de sistemas aquosos submetidos a gelificação, espessamento ou emulsificação/ estabilização. Estes polímeros desempenham uma variedade de funções em meios aquosos, incluindo a utilização como agentes dispersantes e de suspensão, estabilizantes, espessantes, gelificantes, floculantes e coagulantes, formadores de película, humectantes, ligantes e lubrificantes [46-48].

1.1.1.1 Propriedades Reológicas de polímeros de elevado peso molecular solúveis em água

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais e fluidos quando estão sobre aplicação de forças [49]. A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida e a única que caracteriza os fluidos newtonianos, sendo esta a quantidade que descreve a resistência de um fluido ao escoamento [50]. A definição de viscosidade é descrita através do modelo matemático de duas placas, que consiste em imaginar um fluido entre duas placas. O fluido adere a ambas as placas e não escorrega ou desliza ao longo delas (Figura 1.1). Existem

condições de fluxo laminar, significa que o fluxo toma a forma de camadas infinitesimamente finas e não ocorre turbulência [51].

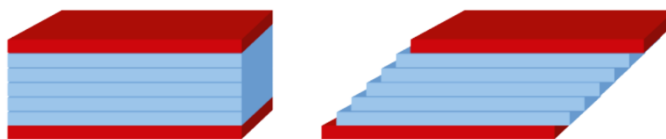


Figura 1.1 modelo das duas placas [51]

As propriedades reológicas dos fluidos relacionam a forma como estes reagem à tensão de corte, esta é definida observando um escoamento laminar e calculada através da razão entre a diferença de velocidade das duas placas e a distância entre elas [51]. Em 1687, Sir Isaac Newton, descreveu o comportamento do escoamento de fluidos com uma relação linear simples entre a tensão de corte e a taxa de deformação angular. Esta relação é atualmente conhecida como lei da viscosidade de Newton, onde a constante de proporcionalidade μ é a viscosidade do fluido [52]. Quando a viscosidade é independente da taxa de deformação angular a que o fluido está submetido, os fluidos com este comportamento, são designados de fluidos newtonianos, em homenagem a Newton, e seguem a seguinte equação:

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (1.1)$$

Onde, τ é a tensão de corte (Pa), μ é a viscosidade (Pa.s) e γ é a taxa de deformação angular (s^{-1}).

Os fluidos que não seguem o comportamento descrito acima são designados de fluidos não newtonianos [53], onde a tensão de corte não é diretamente proporcional à taxa de deformação angular e a viscosidade varia com esta taxa, passando a ser tratada por viscosidade aparente. Estes podem ser classificados de acordo com os comportamentos reológicos, dependentes da variação da taxa de deformação angular, podendo ser: fluido de comportamento plástico de Bingham, fluido dilatante ou fluido pseudoplástico. Caso os comportamentos reológicos sejam dependentes do tempo, estes podem ser caracterizados de dois tipos: tixotrópicos, se a viscosidade diminuir com o tempo e reopéticos, se aumentar com o tempo (Figura 1.2).

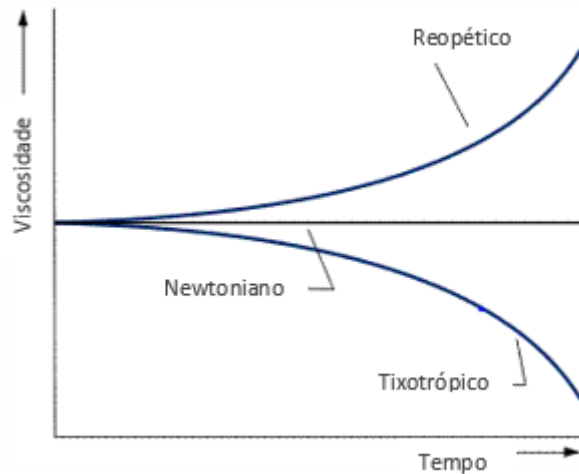


Figura 1.2 Variação da viscosidade em função do tempo para fluidos reopéticos e tixotrópicos.
Adaptado de [54]

As equações seguintes apresentam vários modelos de comportamento para cada tipo de fluido não newtoniano.

O modelo de plástico de Bingham, apresentado na Equação 1.2, mostra a relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento e tem em conta uma tensão inicial (τ_0) que corresponde à tensão mínima para escoar o fluido [55-57].

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (1.2)$$

Onde, τ é a tensão de corte (Pa), τ_0 é tensão mínima de escoamento (Pa), μ é a viscosidade (Pa.s) e γ é a taxa de deformação angular (s^{-1}).

Um outro tipo de fluido que necessita de tensão de corte inicial para escoar são os fluidos de Herschel-Bulkley. Estes fluidos apresentam um comportamento do tipo lei da potência e são definidos pela seguinte equação [31,55,56]:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n \quad (1.3)$$

Onde, τ é a tensão de corte (Pa), τ_0 é tensão mínima de escoamento (Pa), k é o índice de consistência ($Pa \cdot s^n$), n é o índice de comportamento do fluido (adimensional) e γ é a taxa de deformação angular (s^{-1}).

Para fluidos que não necessitam de tensão de corte inicial para escoar, utiliza-se o modelo de Ostwald de Waale, também conhecido por, lei da potência (Equação 1.4) [31,55,56].

$$\tau = k \cdot \gamma^n \quad (1.4)$$

Onde, τ é a tensão de corte (Pa), k é o índice de consistência ($Pa \cdot s^n$), n é o índice de comportamento do fluido (adimensional) e γ é a taxa de deformação angular (s^{-1}).

O valor de n , classifica os fluidos em dilatantes, newtonianos e pseudoplásticos. Se n for maior que 1, o fluido tem um comportamento dilatante, ou seja a viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento. Para índice de comportamento igual a 1 o fluido é newtoniano e se n for entre 0 e 1, o fluido tem um comportamento pseudoplásticos, logo a viscosidade aparente decresce com a taxa de deformação [56,58].

A Figura 1.3 apresenta os vários tipos de fluido através da variação do comportamento da viscosidade em função da taxa de deformação angular.

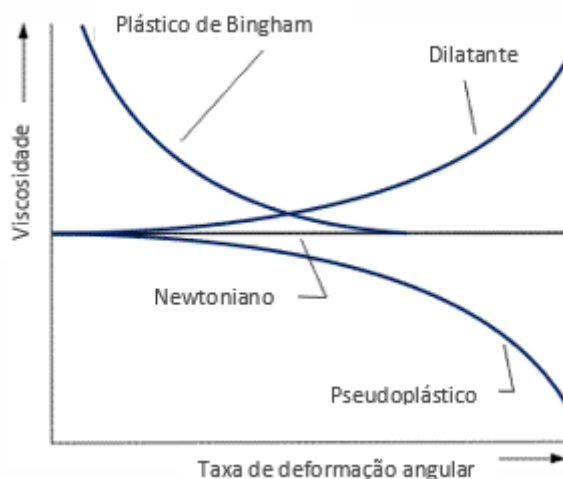


Figura 1.3 Variação da viscosidade em função da taxa de deformação angular para fluidos newtonianos e não newtonianos. Adaptado de [54]

Os fluidos de interesse deste trabalho são polímeros de elevado peso molecular solúveis em água. Estes polímeros apresentam uma diminuição da viscosidade quando há um aumento da taxa de deformação angular, pelo que são conhecidos por “shear-thinning” ou pseudoplásticos [59,60]. Sendo a viscosidade uma característica importante dos fluidos e que pode mudar drasticamente seja por causa da temperatura, peso molecular [61-63] é fundamental medi-la, para tal são utilizados medidores de viscosidade, conhecidos por viscosímetros [64]. Existem vários tipos de viscosímetros entre os quais se destacam (ver Figura 1.4):

- Viscosímetro capilar:** apresenta um tubo capilar em forma de U. O tubo é mantido na vertical e coloca-se o fluido a ser testado no reservatório superior. É medido o tempo de escoamento ao longo do tubo capilar [66].
- Viscosímetro de Stokes:** consiste em diversos tubos com líquidos de viscosidades conhecidas, com uma esfera de aço em cada um deles. O tempo que a esfera demora para descer através do comprimento do tubo depende da viscosidade do líquido. Pode-se assim determinar a viscosidade de um determinado fluido por comparação com os outros tubos, colocando a amostra num tubo semelhante [66].
- Viscosímetro rotativo:** mede a viscosidade de um fluido através da força de fricção de um motor que gira por meio de um sistema de pesos de roldanas [66].

- d) Viscosímetro de Marsh: para fluidos muito viscosos, como a lama e o petróleo, utiliza-se o funil e o cone de Marsh. Este mede a viscosidade através do tempo que o líquido demora a escoar de um reservatório por meio de um orifício aberto no fundo do cone. O cone e o copo de Marsh apresentam as seguintes dimensões (Figura 1.5) [66-68]. O valor da viscosidade através do viscosímetro de Marsh é obtida em segundos/quarto (1quarto= 946,4 ml).



a)



b)



c)



d)

Figura 1.4 Medidores de viscosidade: a) viscosímetro capilar [65] ; b) viscosímetro de Stokes [66]; c) viscosímetro rotativo [66]; d) viscosímetro de Marsh [67]

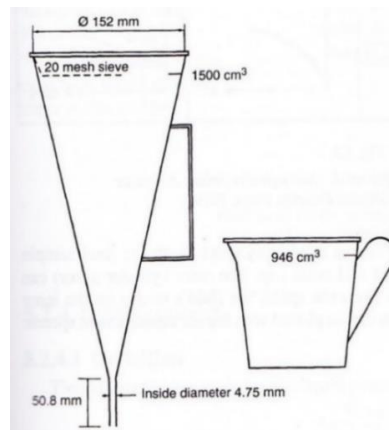


Figura 1.5 Dimensões do funil e cone de Marsh [69]

1.1.1.2 Dissolução de polímeros de elevado peso molecular solúveis em água

De acordo com Billmeyer Jr. [70], a dissolução de polímeros compreende duas etapas. Numa primeira etapa, as moléculas de água difundem-se lentamente dentro do polímero, inchando-o, formando um gel. De seguida, na segunda etapa ocorre a desintegração do gel na solução. Somente nesta etapa a dissolução do material pode ser acelerada com agitação. Contudo para polímeros de elevado peso molecular este processo pode ser muito lento, podendo mesmo demorar dias ou semanas, uma vez que, a dissolução é influenciada pela diferença de tamanho entre as moléculas do polímero e do solvente (água), a viscosidade e o peso molecular do polímero [70,71].

De acordo com C. McGravy [72], os polímeros apresentam quatro etapas de dissolução. A primeira etapa, infiltração, envolve um processo rápido com o solvente que se difunde no polímero, não ocorrendo inchamento do polímero. À medida que a concentração de solvente aumenta, o polímero incha, aumentando o seu volume, esta é a segunda etapa e é chamada de inchamento. Na terceira etapa, chamada de gel, as moléculas de polímero formam um gel. Estas moléculas são inchadas ao máximo pelo solvente, mas as cadeias de polímero permanecem enroladas. O desenrolamento das cadeias conduz à quarta etapa da dissolução, onde as moléculas individuais de polímero são dissolvidas no solvente. O passo que envolve o desenrolamento das cadeias de polímero é um processo demorado, uma vez que é dependente do peso molecular do polímero.

A dissolução de polímeros pode ser um processo complicado, não apenas em laboratório como à escala industrial, uma vez que à medida que o polímero incha, ganha viscosidade e fica pegajoso, colando-se às paredes do recipiente [73].

Na dissolução, os passos mais importantes são a humedificação do polímero e a dispersão do polímero. No momento de humedecimento inicial onde o polímero e a água de diluição são primeiro misturados, é crítico dispersar o polímero na água de diluição de forma eficaz, molhando cada partícula de polímero individual. É necessária uma energia de mistura de alto cisalhamento neste passo do processo de preparação do polímero. Ao fazer isso, a formação de aglomerados de polímero e “fish eyes” é impedida. Além disso, a taxa de hidratação da molécula de polímero é proporcional ao quadrado do raio da partícula de polímero, por outras palavras, quanto menor a partícula de polímero, mais rápido é a sua hidratação, requerendo muito menos tempo de mistura, reduzindo a possibilidade de fratura do polímero [74].

Os polímeros podem ser apresentados em pó ou em “beads”. O tempo de dissolução dos pós, cujo tamanho de partícula se encontra entre zero e um milímetro, pode variar de 30 minutos a 4 horas dependendo do tipo de produto e peso molecular [45]. A vantagem de usar polímeros em forma de “beads” é que a dissolução é realizada num menor tempo (30 minutos) porque a

dimensão das partículas apresenta um tamanho inferior a 300 μm . Tal como os pós, os polímeros em forma de “beads” necessitam do uso de equipamentos de dispersão [45].

Para assegurar a dissolução dos polímeros em água há certos passos que se devem ser considerados: uma dispersão eficaz para uma concentração elevada de solução, permite reduzir o tamanho do equipamento utilizado e aumentar a solubilidade do polímero em água [45]. Existem muitos equipamentos de dispersão como, misturadores pneumáticos, bombas, ejetores, entre outros [75]. A dissolução com agitação deve ser realizada no tempo mínimo recomendado para o polímero de forma que não haja degradação do mesmo. Caso o polímero seja apresentado com aglomerados, ou seja, partículas mal dissolvidas, este, deve ser transferido para um tanque de armazenamento que é agitado [45].

Os polímeros tendem a formar aglomerados de partículas quando dispersos aleatoriamente em solventes polares. As superfícies destes grumos formam uma camada que impede o molhamento rápido dos interiores do agregado. Quando isto acontece, o tempo de mistura total é controlada pela difusão lenta do solvente através desta camada aglomerada para o interior seco. Portanto, a formação de grumos deve ser evitada de modo a evitar ciclos de mistura excessivamente longos [76].

1.1.1.2.1 Molhagem

A Figura 1.6, mostra uma representação esquemática das 3 etapas correspondendo à dissolução de polímeros em meio aquoso.

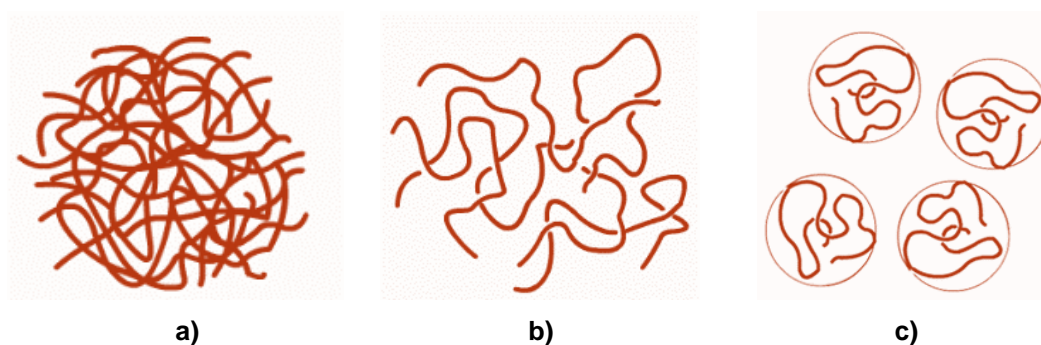


Figura 1.6 Representação esquemática das três etapas da dissolução dum polímero em água [76]; a) primeira etapa- Molhagem: polímero em estado sólido depois de ser adicionado ao solvente; b) segunda etapa- Dispersão: distribuição dos grãos de polímero em meio aquoso; c) terceira etapa: inchamento do polímero e posterior dissolução no solvente

O primeiro contacto do polímero com a água é chamado de molhagem. Neste caso há apenas absorção de água pelo polímero, não existindo qualquer dissolução deste no meio aquoso. De notar que há vários autores [77-79] que afirmam que o polímero deve ser adicionado lentamente para que não se formem aglomerados de polímero e desta forma se evite ciclos prolongados da mistura. Estes aglomerados, também conhecidos “fish eyes”, surgem quando as partículas de polímero são dispersas aleatoriamente em solventes polares, formando uma camada que impede o molhamento rápido no interior do polímero. No entanto quando as forças de interação

polímero-solvente são superiores às forças de interação polímero-polímero, a cadeia de polímero começa a absorver água e desta forma aumenta o seu volume [78].

1.1.1.2.2 Dispersão e hidratação

A dispersão corresponde à distribuição do grão do polímero em meio aquoso. Para que esta dispersão seja eficaz o polímero seco deve ser adicionado lentamente ao meio aquoso e de forma que as partículas sejam bem dispersas na água [79].

A reação de hidratação ocorre quando o solvente é a água. A hidratação acontece em simultâneo com a dispersão e é caracterizada pela capacidade do polímero absorver água [70].

Existem algumas dificuldades na dispersão e hidratação dos grãos de polímeros, uma vez que, muitas vezes, estes flutuam persistentemente no topo do líquido. O material simplesmente flutua na superfície e resiste à molhagem, mesmo quando submetido a agitação vigorosa [80] [81]. Mesmo quando são utilizando dispositivos de mistura de alta velocidade tais como dispersores que geram um vórtice no topo do tanque, estes pós podem ainda demorar um longo tempo a hidratar completamente. Ao invés de quebrar e molhar, muitas vezes formam aglomerados ou "fish eyes", que são muito difíceis de quebrar [81]. Os "fish eyes" são aglomerados de pós parcialmente hidratados caracterizados por uma camada exterior resistente que impede o molhamento completo das partículas dentro do interior. Podem utilizar-se equipamentos que eliminam os "fish eyes" como é o caso da Tecnologia SLIM, que utiliza uma tremonha que contém os pós no seu interior e estes são colocados no misturador, quando atingirem a velocidade de funcionamento a válvula é aberta para permitir o fluxo de sólidos para dentro da agitação. Os pós são rapidamente puxados através do vácuo gerado (Figura 1.7) [81].

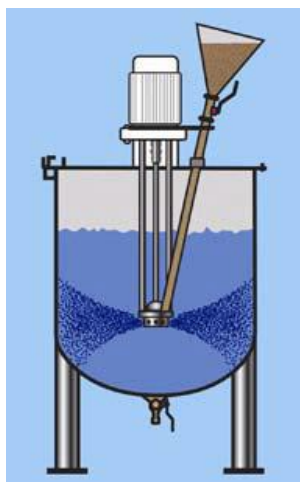


Figura 1.7 Tecnologia SLIM [81]

1.2 Sistemas de Mistura

Os sistemas de mistura são utilizados na indústria para tornar misturas heterogêneas em misturas homogêneas. O tipo de equipamento usado durante a mistura vai depender do estado dos materiais a serem misturados – sólido, líquido e gás - e da miscibilidade dos materiais a serem misturados.

Os tipos de misturas podem ser classificadas de líquido-líquido, gás-gás, sólido-sólido, líquido-gás, gás-sólido, líquido-sólido [82].

Os sistemas de mistura são classificados em três tipos, de acordo com os tipos de materiais que estão a ser combinados: misturadores, agitadores e misturadores pesados [83]. No caso dos misturadores, estes são aplicados em misturas de sólidos [84]. Os agitadores combinam líquidos com outros líquidos ou gases e os misturadores pesados, realizam a mistura de fluidos viscosos e substâncias pastosas [83].

Quando se pretende obter uma mistura do tipo sólido-líquido, tem-se o exemplo de partículas de polímero em água, cujo objetivo é a obtenção de uma mistura homogênea, sem grumos e totalmente hidratado, algumas dificuldades na mistura deste sistema polímero-água podem surgir, uma vez que apresenta um comportamento não newtoniano, ou seja a viscosidade dificulta o movimento do fluido (fluidos não newtonianos apresentam dependência ao cisalhamento - à variação da viscosidade à medida que o fluido é cortado (movido) pelo misturador) [56]. A viscosidade tem o efeito de resistir ao movimento do fluido, de modo que o movimento criado por um impulsor do misturador num fluido viscoso pode desaparecer antes de mover todo o conteúdo do tanque. Nesse ponto, a viscosidade sozinha torna a mistura do fluido mais difícil do que a mistura de fluidos de baixa viscosidade, semelhantes à água. Impulsores pequenos podem apenas fazer uma agitação leve no líquido, enquanto, impulsores grandes podem mover todo o fluido contido num tanque. Na abordagem para misturar fluidos não-newtonianos e outros líquidos viscosos deve-se utilizar um grande impulsor ou vários impulsores, de modo que o misturador atinja outras partes do tanque [85].

As operações de mistura são realizadas para fluidos de baixa viscosidade em regime turbulento, fluidos de viscosidade moderada em regime de transição e fluidos de elevada viscosidade em regime laminar [86]. Para determinar se um processo é operado em regime laminar, o número de Reynolds (Re) tem de ser calculado. De um modo geral o regime de operação será laminar se $Re < 10$, de transição se $10 < Re < 10^4$ e turbulento quando $Re > 10^4$. O Reynolds é um número adimensional e para os impulsores define-se através da expressão (1.5).

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (1.5)$$

Onde, ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), N é a velocidade de rotação do impulsor (rad/s), D é o diâmetro do impulsor (m), μ é a viscosidade do fluido (Pa.s) [87].

1.2.1 Sistema de mistura por agitação mecânica

Os sistemas por agitação mecânica são os mais utilizados na indústria, estes favorecem a mistura através da movimentação do líquido em tanques. Uma desvantagem do uso de agitadores em tanques é a formação dum vórtice que dificulta a mistura, para minimizar este efeito, colocam-se defletores ou chicanas nas paredes do tanque [88].

Os agitadores apresentam uma gama de funções tais como misturar líquidos, dissolver um gás num líquido, homogeneizar ou dispersar líquidos que são incapazes de se misturar, suspensão de sólidos em líquidos e transferência de calor. Todas estas ações são realizadas em recipientes agitados por impulsores giratórios, estes impulsores são separados em duas categorias - axiais e radiais - que, como os seus nomes sugerem, provém do ângulo em que a pá do impulsor contacta o plano da rotação [83].

- Impulsores de fluxo axial (Figura 1.8): correntes paralelas ao eixo do agitador. São aquelas cujas pás fazem um ângulo menor que 90° com o plano de rotação do impulsor. Os impulsores de fluxo axial induzem fluxos de cima para baixo com o objetivo de: misturar líquidos, realizar suspensão de sólidos; incorporar pó seco em líquido; promover transferência de calor. Devem ser utilizados em situações em que são necessárias taxas de deformação angular elevadas, tais como em processos de dispersão [89].
- Impulsores de fluxo radial (Figura 1.9): correntes tangenciais ou na direção perpendicular ao eixo do impulsor. O fluxo é perpendicular às paredes do tanque. O fluxo radial afeta o lado que provoca uma direção para cima ou para baixo que preenche o topo superior e o fundo do impulsor para ser ejetado mais uma vez. Também é importante notar que a configuração de defletores ou chicanas ajuda a minimizar vórtices e movimentos de turbilhão no tanque, portanto, aumentando a eficiência da agitação [90].

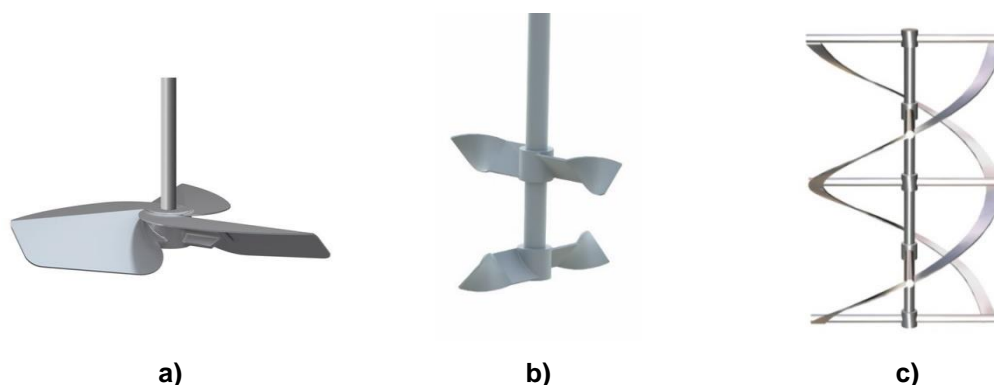


Figura 1.8 Impulsores de fluxo axial: a) impulsor de três pás [91]; b) impulsor JT2 [92,93];
c) helicoidal [94]

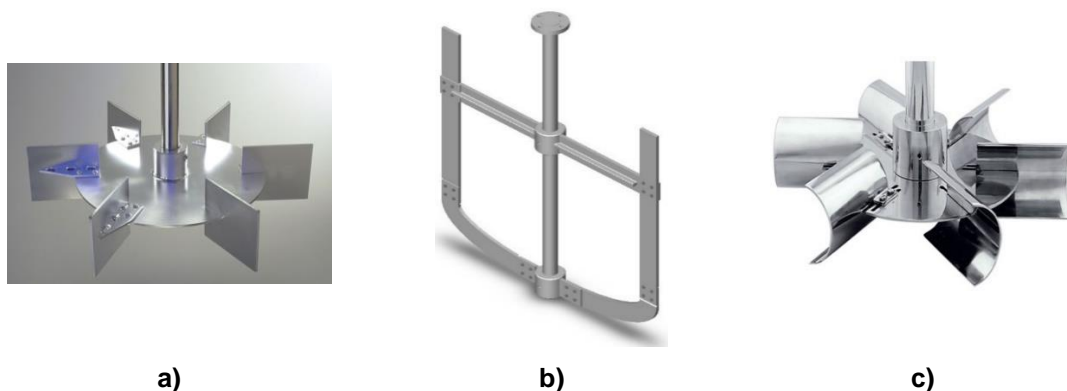


Figura 1.9 Impulsores de fluxo radial: a) impulsor de Rushton; b) impulsor de âncora; c) impulsor de Smith

No ano de 1941, Ivan S. Brumagim [95], criou um agitador de hélice radial, particularmente direcionado para agitar, misturar e dissolver ou permitir a gaseificação de líquidos, misturas de líquidos e sólidos e líquidos e gases através da indução de um fluxo de líquido direcionado radialmente pelo agitador (Figura 1.10).

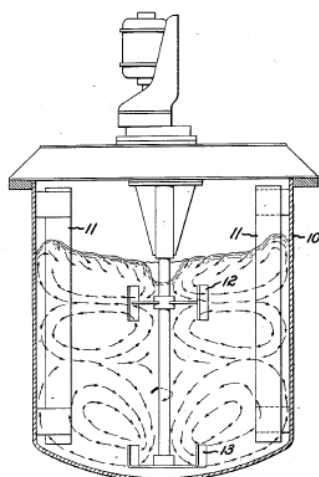


Figura 1.10 Esquema de um agitador, montado num tanque cilíndrico com o eixo de rotação vertical e na linha central do tanque: 10,11) deflectores verticais (chicanas), usados para eliminar o vórtice do material; 12) membro superior do agitador: composto por três braços, provoca maior agitação sem aumentar a resistência do movimento na direção de rotação; 13) membro inferior do agitador: os braços das pás formam uma barra plana, está posicionada de modo a minimizar a resistências dos braços da pá à rotação [95]

Em 1947, Edwin Cowles Cayuga [96] patenteou um dispositivo que pode ser utilizado para desintegrar, dispersar e manter em suspensão sólidos insolúveis, serve também para dissolver sólidos. O aparelho pode também ser utilizado para dispersar gases em líquidos e para dispersar um líquido noutro líquido. É utilizado por exemplo no tratamento do papel, mistura de tintas e preparar emulsões. Este dispositivo constitui uma melhoria do sistema utilizado para dispersão sólidos em líquidos (Figura 1.11) [97]. Para obter melhores resultados nas características mencionadas acima, cada impulsor não deve ter um diâmetro inferior a $1/3$ do diâmetro do tanque e as pás devem estar espaçadas ao longo do veio a distâncias não inferiores ao raio dos impulsores (Figura 1.11).

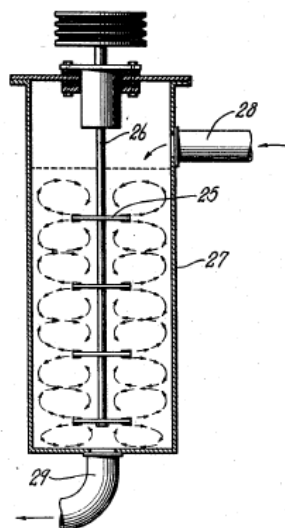


Figura 1.11 Esquema ilustrativo da invenção, aplicada a um sistema contínuo: 25) conjunto de pás montadas num veio comum- 26); 27) instalação do dispositivo num tanque cilíndrico; 28, 29) tubos de entrada e saída

Em 1955, Lee Samler [98], de forma a obter uma dispersão uniforme do fluido num material granular patenteou um sistema que mistura o material em forma de partículas num solvente e de seguida o solvente é evaporado, o material obtido é então desintegrado mecanicamente.

Em 1960, David Bosse [99], criou um sistema de pás especializadas para misturar fluídos de elevada viscosidade (>1000 cP), (>1 Pa.s, em unidades SI). O sistema consiste numa pá que roda sobre um eixo na horizontal permite uma agitação a velocidade constante, provocando uma circulação do fluido de cima para baixo. São utilizadas duas pás aerodinâmicas que se projetam para cima num ângulo de 10° a 80° com o eixo do agitador e o comprimento das pás é pelo menos cerca de 0,2 e preferencialmente de 0,3 a 0,6 vezes o seu comprimento radial (Figura 1.12).

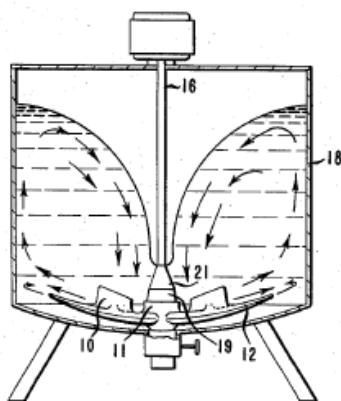


Figura 1.12 Esquema ilustrativo (vista lateral da invenção) [99]: 10) pás do impulsor que rodam num meio fluido;

Em 1962, Frank E. Browning [100], patenteou a invenção que apresenta aperfeiçoamentos nos impulsores. Os objetivos da invenção era melhorar a mistura, dissolução e dispersão de líquidos e de outros materiais (Figura 1.13).

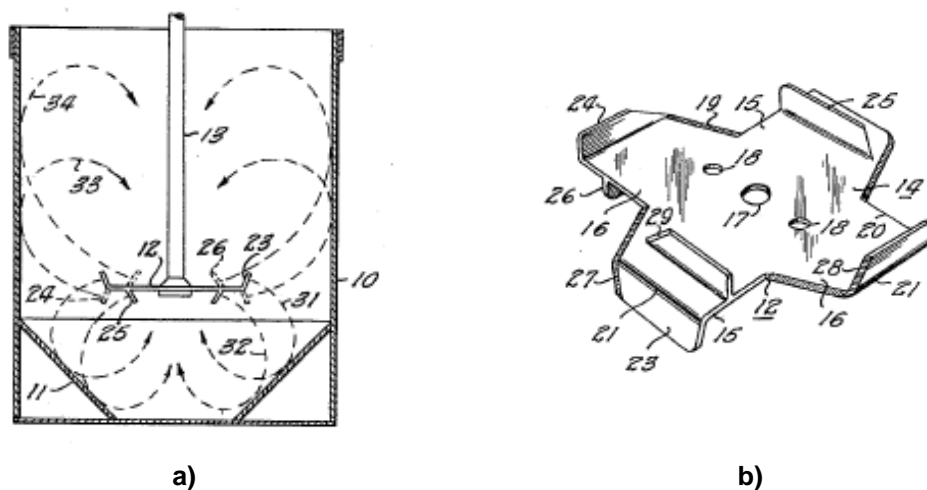


Figura 1.13 Esquema ilustrativo da invenção [100]: a) vista transversal do tanque de mistura com o impulsor: 10) tanque de mistura que pode ser cilíndrico e tem um fundo em forma de cone truncado; b) vista inferior do impulsor: 15,16) apresenta uma pluralidade de braços ou pás, separadas à mesma distância

Em 1967, Warren M. Zingg e Tusla Okla [101], patentearam um edutor que é útil na mistura de líquidos e sólidos que tendem a aglomerar-se em algumas partes do aparelho de mistura em contacto com o mesmo. A mistura de certos materiais em partículas tais como: goma de guar, bentonite e poliácrilamida solúveis em água por exemplo têm sido dificultadas, uma vez que, as partículas de material molhado acabam por obstruir a passagem através do sistema.

Um outro sistema de agitação mecânica sem a utilização de impulsor é o edutor. O esquema representativo de um edutor está ilustrado na Figura 1.14. Um edutor é um sistema que utiliza o princípio de Venturi. O princípio de Venturi considera que quando há um estreitamento dentro de um tubo (em forma de ampulheta), o fluido em movimento constante comprime-se momentaneamente ao encontrar a zona de estreitamento, diminuindo a pressão e aumentando a velocidade ao atravessar essa zona. Nessa zona ao introduzir-se um duto, encontrar-se-á uma sucção do fluido contido nessa ligação [102,103].

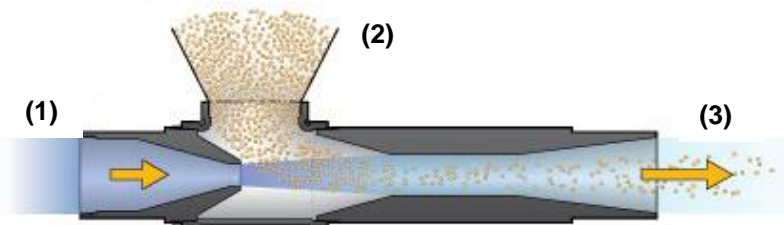


Figura 1.14 Esquema ilustrativo de um edutor [104]: (1) entrada de ar ou água; (2) entrada de produto em pó/ sólidos granulados; (3) descarga

No ano de 1973, o criador George Latinem [105], criou um misturador com pás para fluídos de viscosidade superior a 10 000 cP (10 Pa.s, em unidades SI). O misturador apresenta um deslocamento angular que varia entre 10° e 45° em cada pá (Figura 1.15)

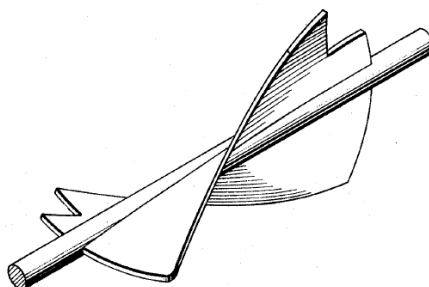


Figura 1.15 Representação de uma pá para fluídos de elevada viscosidade [105]

Em 1992, o inventor Thomas Socha [106], patenteou um equipamento de mistura que consiste num impulsor rotativo composto por uma multiplicidade de pás. Cada pá integra um ângulo ótimo que tem em conta o fluido que está a ser misturado (as pás têm entre si um ângulo ótimo de $15^\circ \pm 2^\circ$ em relação ao eixo do impulsor) (Figura 1.16)

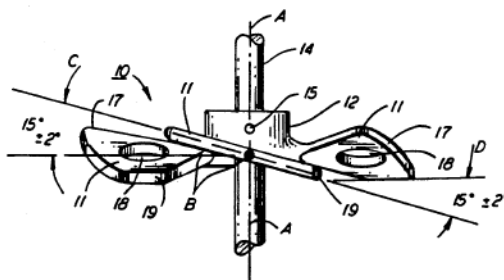


Figura 1.16 Vista lateral do impulsor da invenção: 10) o impulsor incorpora cinco pás; 11) as pás estão posicionadas na secção do cubo; 12) a secção do cubo, tem um furo onde um eixo rotativo está instalado (14); 15) um "pin-hole" disposto na secção de cubo (12) proporciona a inserção de um parafuso (não ilustrado) para fixar a secção de cubo (12) ao eixo rotativo (14); Cada pá (11) prolonga-se radialmente para fora ao longo de um eixo radial (B) que é perpendicular ao eixo (A); tem um bordo circunferencial (17); Cada pá tem um furo de passagem elítica (18); cada pá tem um bordo circunferencial (19) [106]

Em 2001, Ryuichi Yatomi e o seu grupo de investigadores [107], patentearam um aparelho de agitação vertical que permite agitação de vários tipos de fluidos e pós. A particularidade deste sistema de agitação vertical é o fato de o tanque apresentar um fundo cónico (de ângulo inferior a 60°) e permite reduzir o tempo de mistura verticalmente uniforme (Figura 1.17).

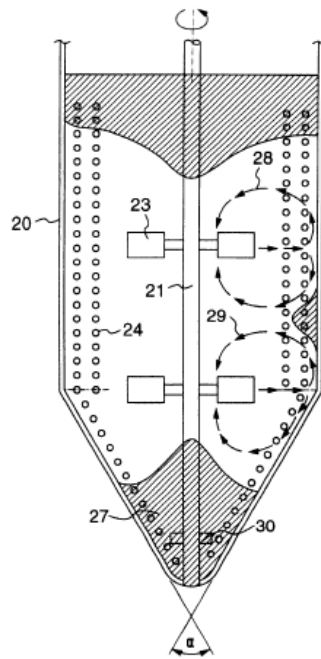


Figura 1.17 Ilustração esquemática da invenção [107]: 20) tanque de fundo cônico que apresenta um ângulo de vértice ($\alpha=60^\circ$); 21) eixo vertical do impulsor; as pás (23) movimentam o líquido para a periferia do tanque que se encontra ligada ao eixo vertical do sistema; 24) bobinas dispostas na parte periférica do tanque; 27) ocorre estagnação do líquido na parte final da ponta do fundo cônico, quanto maior a viscosidade do líquido, mais elevada é esta tendência

No ano de 2006, Wilmer Parker [108] criou um sistema que mistura fluidos num período curto de tempo e que era capaz de movimentar o fluido de baixo para cima no tanque e misturar líquidos relativamente viscosos (Figura 1.18).

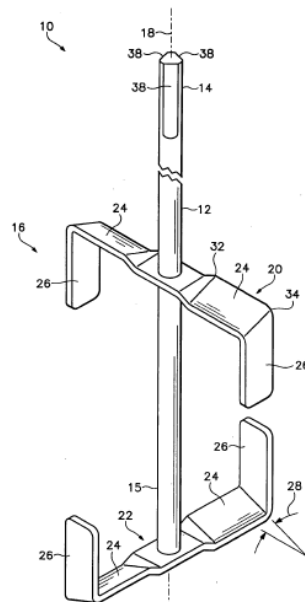


Figura 1.18 Ilustração esquemática do impulsor da invenção [108]: 10) impulsor; 12) eixo vertical do impulsor; 14) 20;22) pás do impulsor com dois braços horizontais respetivamente (24) e dois membros paralelamente posicionados com o eixo vertical (26)

Em 2009, os japoneses, Hiroyuki Matsumoto, Mutsuo Kuramoto e Masahiko Hiraki [109], patentearam um agitador capaz de misturar e dispersar uma variedade de fluidos de vários volumes e de diferentes viscosidades.

No ano de 2010, o inventou William Lott [110], patenteou um método de misturar fluidos utilizando um edutor. A invenção tem como objetivo a mistura de um fluido estático com outro componente, como material em partículas, líquido, líquido compressível ou gás ou combinação, utilizando uma corrente de fluido, produzindo uma região de baixa pressão dentro do fluido estático através de um edutor radial contido no tanque. Caso o edutor utilize gás para efetuar a mistura do fluido, este é introduzido a uma pressão entre os 40 psi (282 kPa) e 150 psi (1034 kPa) e o fluido a ser misturado, numa viscosidade entre a viscosidade da água e a viscosidade de fluidos pastosos de até cerca de 1200 centipoise (1,2 Pa.s).

1.2.2 Sistemas de mistura por jatos

Podem também ser utilizados sistemas misturadores a jatos (Figura 1.19). Este sistema é usado em diversas aplicações nomeadamente no tratamento de águas residuais, indústria petroquímica, alimentar e agrícola e também na indústria química numa variedade de processos para misturar ou favorecer a suspensão de sólidos. É preferencialmente usado em tanques de grandes dimensões ($>37.854 \text{ m}^3$), ou aplicado em tanques fundos. O sistema é operado através do princípio do edutor [111]. O sistema de mistura a jatos é composto por dois componentes principais: uma linha composta por vários bucais, onde sai os jatos de água (a linha é colocada no fundo do tanque) e bombas de recirculação que puxam o líquido do tanque e o bombeiam hidráulicamente de volta para a linha de jatos [111] [112].

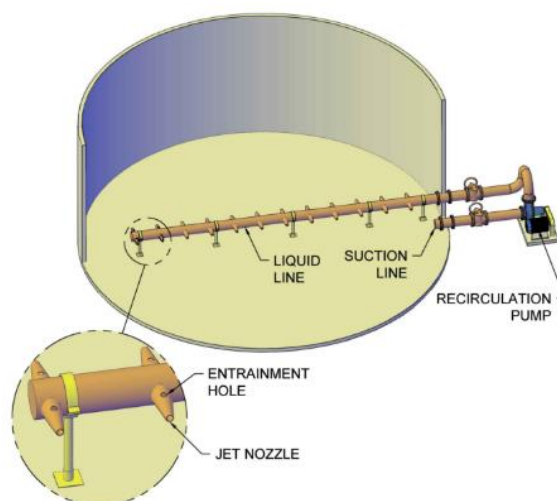


Figura 1.19 Esquema ilustrativo de uma montagem do sistema misturador a jatos [111]

1.2.3 Sistemas de mistura por ar comprimido

Ao longo dos anos foram utilizados vários sistemas para misturar sólidos ou líquidos, desde pás a agitadores que contêm tremonhas. Existem também outros sistemas de mistura que envolvem equipamentos de injeção de ar dentro de uma câmara, de modo a agitar o conteúdo contido na câmara. Em 1964 [113], foi criado um novo método para misturar materiais sólidos, como granulados, em outros materiais ou fluídos. Este sistema consiste em misturar os sólidos num recipiente e de seguida sujeitá-los a uma corrente de ar que é introduzida no fundo da coluna.

Em 1965, foi publicada a primeira patente sobre o sistema *Blendcon® Air Blender* (Figura 1.20) [114][115] que permite a mistura de substâncias granuladas ou de pós através de um cone que descarrega ar em fluxos de jatos concentrados, criando deste modo uma multiplicidade de turbulências entre as partículas misturando-as entre 20 minutos a 2 horas dependendo do tipo de material a misturar. No ano 1990, o sistema foi melhorado, existindo uns pistões dentro do sistema que são operados para aplicar o ar sob pressão através das aberturas do coletor [116] [117] [118]. Atualmente o sistema permite a uma mistura de baixo cisalhamento de forma rápida, a mistura é obtida em 30 segundos [119].



Figura 1.20 misturador *Blendcon® Air Blender* [84]

Em 1968, Axel Lippert e Krefeld-Bockum [115] patentearam um aparelho para o mesmo objetivo. O aparelho consiste num método de mistura ou humedecimento do material em pó, onde este é fluidizado através de um prato arejado.

Em 1974 [120], surgiu um dispositivo misturador que prometia misturar mais rapidamente o material em pó num líquido que consistia num reservatório contendo o pó a ser dissolvido e que de seguir era aspirado para câmara de mistura através de uma corrente de ar comprimido, e no outro ramo de entrada era introduzida água e deste modo fornecer uma mistura completa do pó.

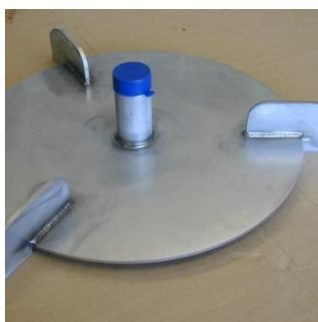
Em 1979, os inventores Pedro Cabrera e Robert T.Duncan [121], patentearam um sistema que envolve a utilização de bolhas para misturar o conteúdo de um recipiente. Este é inspirado [122, 123] num aparelho que consiste num recipiente onde o líquido é introduzido e de seguida é misturado e drenado sem a utilização de qualquer dispositivo de mistura mecânica, sem contaminação e sem agitação, de tal modo que não se formam bolhas de crescimento lento ou persistentes. Este aparelho é adaptado para ligar a um sistema para o processamento

automático contínuo de amostras. A invenção de Cabrera e Duncan permite reduzir os problemas de sistema de mistura de bolhas, através de uma válvula que regula o tamanho e a frequência das bolhas.

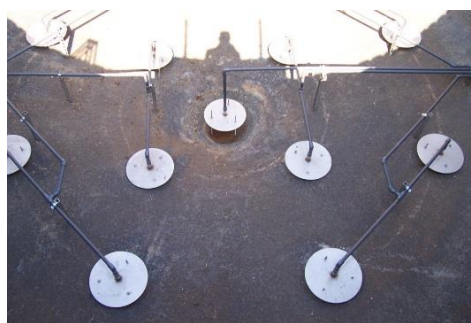
Em 1982 [124] foi criado um sistema para homogeneizar e/ou misturar, materiais em pó com vários orifícios na base do recipiente, o gás é fornecido através dos orifícios promovendo a mistura mesmo em materiais difíceis.

1.2.3.1 Sistema Pulsair

A *Pulsair Systems* foi fundada em 1983 por Richard E. Parks [125], que patenteou um sistema a ar comprimido. Esta tecnologia permite a mistura de líquidos de alta viscosidade, provocando o menor cisalhamento possível, promovendo a mistura de líquidos usando explosões de ar sequencialmente injetadas ou pulsos de ar comprimido ou gás. Os pulsos de ar são libertados através de uma série de discos planos e redondos chamados de placas acumuladoras que são presas ao fundo do tanque. Localizando estrategicamente as placas de acumulação no chão do tanque, praticamente 100% do conteúdo líquido do tanque pode ser uniformemente misturado.



a)



b)

Figura 1.21 a) placas acumuladoras [126]; b) placas distribuídas no fundo do tanque [126]

As principais vantagens dos misturadores de ar pulsado são a simplicidade e a ausência de partes móveis dentro do tanque. O equipamento é altamente confiável, seguro para operar e económico. O “hardware do mixer” pode ser instalado através de um tubo elevador de tanque de pequeno diâmetro e removido após semanas de operação numa mistura mal caracterizada.

O sistema que utiliza ar comprimido permite a formação de bolhas e estas são obtidas através da utilização de um compressor, válvulas e controlos. Este sistema permite através do uso de apenas um compressor permite a mistura em vários tanques, mesmo com diferentes processos, reduzindo os custos de manutenção [127-129].

O equipamento essencial desta tecnologia, inclui um conjunto de placas acumuladoras (Figura 1.21a) (geralmente placas duplas separadas verticalmente), linhas de alimentação pneumáticas para as placas acumuladoras, uma unidade de controlo com uma válvula de injeção separada

em cada linha e tanques de gás e reservatório de alta pressão para operar o sistema a pressões de até 100 psig ($6,89 \times 10^5$ Pa, em unidades SI) [130,131].

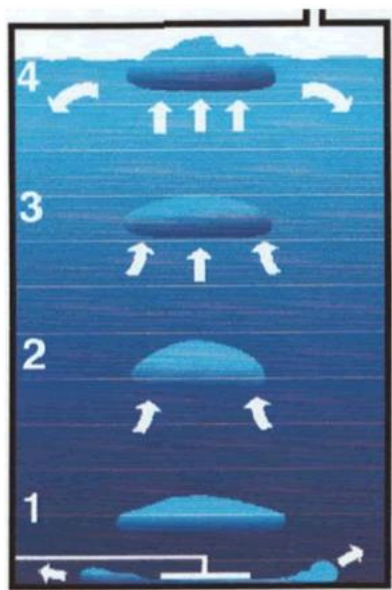


Figura 1.22 Movimentação da bolha através do sistema Pulsair [132]

A Figura 1.22, representa a movimentação da bolha no líquido: (1) A placa acumuladora é colocada no fundo do tanque, de seguida pulsos de ar ou gás são libertados junto da placa; (2) bolhas grandes são formadas acima da placa e começam a subir até à superfície; (3) as bolhas continuam a subir, forçando as partículas mais pesadas a subir criando uma ação de mistura vertical que permite a mistura de todo o conteúdo do tanque; (4) as bolhas rebentam à superfície e empurram o líquido do topo do tanque para os lados e dos lados para o fundo do tanque, completando a circulação, realizando um movimento convectivo [132,133].

O sistema de pulsos de ar é utilizado em processos de tratamento de águas residuais [134], mas também é aplicado em várias indústrias. No caso da agricultura, para a mistura de fertilizantes líquidos [135,136]. O sistema é também usado na modalidade desportiva de saltos para a água (saltos ornamentais) de modo a favorecer um ponto de entrada suave para o mergulhador, caso este entre na água num ângulo errado [137,138]. Também é utilizado na indústria petrolífera, para a mistura do petróleo e lubrificantes [139] e aplicado em vinicultura de forma a misturar o vinho durante o processo de fermentação [140,141].

Na utilização do sistema Pulsair há que ter em conta certos parâmetros que afetam o tamanho da bolha e a eficiência da mistura [125,142]. A injeção de ar a uma pressão relativamente alta em um curto período de tempo, ou seja, menos de um segundo, resulta na formação de uma bolha que é hemisférica na sua superfície superior, mas um tanto plana ou mesmo côncava ao longo da sua superfície inferior, apresentando assim a forma ou a configuração de um segmento esférico. O tamanho da bolha é regulado pela válvula de injeção que está aberta ou fechada pelo controlador, pelo tamanho do tubo de entrada e pela pressão da linha de ar. A placa acumuladora

não necessita de ter qualquer espessura específica, mas é desejável que seja redonda e de cerca de 1/10 a 1/20 o diâmetro do tanque. O diâmetro preferido da placa acumuladora é aproximadamente 1/16 do diâmetro do tanque. A Figura 1.23, mostra o crescimento da bolha através do sistema pulse air. Quando o ar do compressor chega aos pratos de acumulação, a bolha em crescimento expulsa o líquido radialmente para fora da parte inferior da placa. O crescimento da bolha continua radialmente para fora além do limite da placa acumuladora a uma distância R_{pulso} do centro da placa.

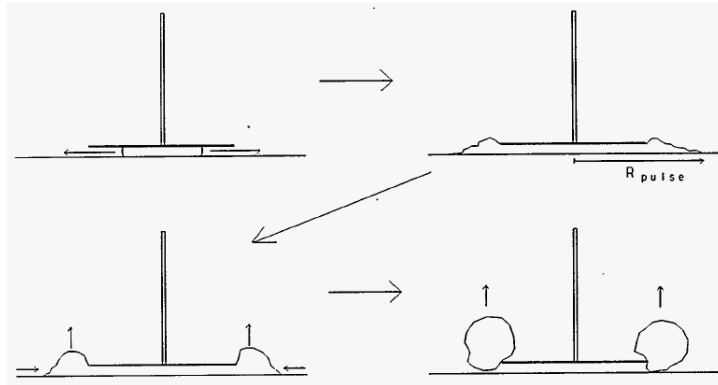


Figura 1.23 Desenho do crescimento da bolha mostrando o R_{pulso} [142]

O $2R_{pulso}$ é uma relação indicada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América que corresponde à área máxima de afetação da bolha [142], permitindo correlacionar o tamanho da bolha com as áreas de mistura observadas na maioria das experiências. Uma vez que a área de afetação está relacionada com o diâmetro do prato de acumulação e o diâmetro da placa de acumulação está relacionado com o tamanho da bolha. Além disso é afirmado por Powell que o raio do pulso previsto pela bolha pode ser calculado [142]. O cálculo é afetado pelo diâmetro da placa acumuladora, pelo diferencial de pressão e pelo diâmetro dos tubos pneumáticos (ver Equação 1.6)

$$R_{pulso} = 0.8 \times D_{placa\ acumuladora}^{0.31} \times \Delta P^{0.39} \times D_{tubo}^{0.51} \quad (1.6)$$

Relativamente à frequência das bolhas, Richard E. Parks, afirma que o tempo entre bolhas precisa de ser definido pelos limites da coluna de água, isto é, somente quando a primeira bolha de ar atingir a superfície da coluna de água é que a segunda bolha deve ser formada. Esta sequência de pulsos é a melhor maneira de obter um movimento convectivo do líquido do tanque [143,125].

1.3 Dinâmica de fluidos computacional

A Dinâmica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, “CFD”), começou em 1970, iniciou-se com uma combinação de disciplinas como física, matemática e ciências computacionais, com o intuito de simular o comportamento dos fluidos [144]. É baseada nas equações de Navier-Stokes, que descrevem como a velocidade, a pressão, a temperatura e a densidade de um fluido em movimento estão relacionadas. Apresenta várias aplicações em várias indústrias, como por exemplo a indústria alimentar [145], química [146], agrícola [147], aeroespacial [148] [149], automóvel [150], indústria do petróleo [151], AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) [152][153].

A dinâmica de fluidos computacional permite simular vários tipos de escoamento de fluidos, como é o caso do escoamento por transferência de calor [154], reação e combustão, escoamento monofásico, que tal como o nome indica é considerado apenas uma fase, gás ou líquido [155] [156], o escoamento multifásico que engloba o escoamento de duas fases e o escoamento de partículas.

A modelação de escoamentos multifásicos é muito complexa e envolve o escoamento simultâneo de duas ou mais fases de interação. Além disso, há também limitações de tempo, capacidade do computador para realizar estudos numéricos. Isto conduziu ao desenvolvimento de modelos que podem explicar diferentes níveis de informação e diferentes níveis de precisão. Os modelos são capazes de descrever e prever o comportamento de um escoamento multifásico. Nos modelos de Euler-Lagrange, as partículas são englobadas ao nível de uma única partícula, que se refere a uma partícula sólida ou uma bolha/ gota de gás/ fluido [157]. Nos modelos de Euler-Euler todas as fases são consideradas fases contínuas, por essa razão, os modelos são normalmente chamados de modelo multi-fluidos. A utilização de modelos multi-fluidos é apropriada para escoamentos separados onde ambas as fases podem ser descritas como contínuas. No entanto, a abordagem de Euler-Euler pode também ser utilizada para modelar escoamentos dispersos, quando o interesse é o movimento global das partículas ao invés de rastrear partículas individuais [157]. Um outro método de modelação é o de método do volume de fluido (“Volume Of Fluid”, VOF). Este método utiliza o modelo de Euler-Euler, onde todas as fases são tratadas como contínuas, mas ao contrário dos modelos apresentados anteriormente, o modelo VOF, não permite que as fases se interpenetrem. O método VOF utiliza uma função de indicador de fase, de forma a visualizar a interface entre duas ou mais fases. A função de indicador de fase tem um valor um ou zero quando o volume de controlo é inteiramente preenchido com uma das fases e um valor entre um e zero se uma interface estiver presente no volume de controlo. Assim, a função indicador de fase tem as propriedades da fração de volume.

Em ambas as abordagens dos modelos de Euler-Lagrange e Euler-Euler a modelação é necessária para descrever a fase dispersa. A forma mais simples e a mais comum, especialmente para modelos de dois fluidos, é descrever a fase dispersa como partículas esféricas que mantêm o diâmetro constante em todo o regime de fluxo. No entanto muitos

problemas práticos dizem respeito ao escoamento polidisperso, ou seja, escoamento com partículas de forma variável e tamanho. Além disso as partículas podem mudar de forma e/ ou tamanho, por exemplo devido à coalescência e dissolução, como é o caso dos escoamentos de bolhas dispersas. Os modelos de balanço populacional (“Population Balance Models”, PBMs) são bastante avançados que preveem fenómenos como é o caso da coalescência, nucleação e quebra de bolhas/ gotas e distribuição de tamanho de partículas num regime de escoamento [157] [158].

1.3.1 Simulação de escoamento multifásico

Em 1997, foi realizada uma simulação CFD de um escoamento de uma e de duas fases em separadores de ciclones cilíndricos para um sistema gás-líquido [155]. No escoamento de uma fase é utilizado o sistema de código CFX (da ANSYS), de forma a entender o comportamento do escoamento hidrodinâmico do separador de ciclone cilíndrico, foi utilizando o mesmo software para a simulação do escoamento de duas fases. Foram considerados os modelos Euler-Euler (dois fluidos e homogêneos) e o modelo Euler-Lagrange (onde uma fase é arrastada noutra fase contínua). Como o objetivo principal da simulação de escoamento de duas fases é examinar os efeitos da interação e da interface entre as fases gasosas e líquida, foi selecionado o modelo de Euler-Euler.

Em 2006, foi realizado um estudo experimental e de simulação numérica para prever diferentes características no processo de mistura de fluidos não-newtonianos [159]. No estudo foi considerado o sistema de mistura (impulsos de 6 pás), a viscosidade do fluido não newtoniano, definida pela lei da potência, o número de Reynolds de uma mistura não-newtoniana. Considerou-se o modelo VOF, que considera que dois ou mais fluidos (ou fases) não são impenetráveis e para cada fase adicional, ao problema, uma nova variável é introduzida: a fração volúmica da fase.

Em 2008, foi realizada uma análise CFD [160] que visa a obter informação sobre a suspensão de sólidos e as suas implicações no processo de mistura em fase líquida num reator agitado sólido- líquido. O fluxo turbulento sólido-líquido num reator agitado foi simulado utilizando um modelo de dois fluidos com o modelo de turbulência k- ϵ . Para este estudo foi utilizado o programa Fluent e foram estudados para um escoamento sólido-líquido num reator agitado, a influência do tamanho da grelha, distribuição de sólidos, qualidade da suspensão. Em 2012, foi também apresentada uma simulação CFD para um sistema de mistura sólido-líquido [161]. Para esta simulação é utilizado o modelo multifásico Euler-Euler para estudo hidrodinâmico e foi também utilizado o modelo de mistura turbulenta k- ϵ e o modelo de turbulência dispersa k- ϵ .

Em 2010, foi apresentado um artigo sobre simulação do escoamento disperso de bolhas [162]. Os autores do artigo, modelaram o escoamento utilizando um método que aproxima o movimento médio das bolhas utilizando um *solver* multifásico de fase contínua. Pequenos números de bolhas podem ser simulados por *solvers* de escoamento multifásico combinados com uma estrutura Euleriana de monitorização. Para este estudo os autores consideraram as bolhas dispersas

como partículas esféricas e apresentaram um método que consideraram como simples e rápido para o escoamento da bolha dispersa. De forma a simular um conjunto de bolhas realizaram um separaram o *direct numerical solver* em duas etapas. Numa primeira etapa em vez de calcular a condição limite discreta entre gás e líquido adotaram uma abordagem para interpretar o escoamento de bolhas dispersas como um contínuo. Em seguida as interações *subgrid* entre as bolhas foram calculadas usando um estocástico *solver*. O resultado permite simular cenas complexas com milhões de pequenas bolhas em menos de 16 segundos por *frame* num único computador.

No ano de 2010, Binxin Wu [163], apresentou um artigo que apresenta um modelo de escoamento multifásico de Euler que caracteriza a mistura de gás em digestores anaeróbicos. Foi utilizado o software Fluent 12.0 para a simulação do escoamento multifásico do digestor. Os resultados da simulação de um digestor de tamanho pequeno são validados pela comparação com os dados experimentais da literatura. A mistura de gás num digestor anaeróbio é um complexo multifásico e de escoamento turbulento que é relacionado pela massa, conservação do momento, transporte turbulento e transferência de momento de interface.

Em 2011, Rinaldo Galdamez, Stephen Wood e Seckin Gokaltun [164], realizaram uma simulação numérica da tecnologia *Pulsed-Air Mixing* utilizando o método multifásico de CFD. Para simular o sistema os autores utilizaram dois programas o COMSOL Multiphysics e o OpenFOAM. Utilizaram-se vários métodos como o *phase field method* (PFM), o VOF e o LES (*Large Eddy Simulation*). O método VOF e PFM foi utilizado para determinar a velocidade de subida da bolha e a sua circularidade.

As capacidades de CFD do COMSOL Multiphysics e OpenFOAM foram implementadas para a simulação do estudo de uma única bolha e a tecnologia de ar pulsado. Para a primeira simulação, foi mostrado que ambos os *solvers* numéricos são capazes de modelar e validar com precisão o estudo de bolhas [164].

A configuração experimental PNNL para a tecnologia de mistura de ar pulsado foi modelada em ambos os *solvers* numéricos em um espaço bidimensional e metade do domínio fluido, a fim de utilizar eficientemente os recursos computacionais disponíveis. Os resultados da simulação realizada com PFM no COMSOL Multiphysics, conclui que um modelo de turbulência é essencial para a modelação precisa deste tipo de tecnologia de mistura [164].

Os resultados fornecidos pelo LES estão de acordo com os dados experimentais fornecidos pelo PNNL dentro de uma margem de erro razoavelmente baixa. Assim, pode-se também concluir que a simulação dessa aplicação no espaço bidimensional não prejudica a capacidade de alcançar bons resultados com os *solvers* numéricos.

Em 2012, foi estudado o escoamento de líquidos de gás-newtoniano de duas fases [165]. O modelo de CFD de duas fases foi implementado em Star CCM+, utilizando o volume de fluido (VOF), o objetivo era a caracterização da viscosidade que determina o regime hidráulico e o comportamento do escoamento do sistema. A fração de vazio do escoamento gás-líquido

newtoniano e gás-não-newtoniano de duas fases em um tubo vertical foi analisada usando o modelo de volume de fluido (VOF) implementado em Star CCM+. Também foi comparado diretamente com medidas experimentais e relações empíricas relatadas na literatura. Os resultados do CFD mostraram uma relação entre as medidas experimentais e as relações empíricas. A partir dos resultados simulados pelo CFD verificou-se que as correlações empíricas apresentam resultados piores que as experimentais, com erros de 47,6% para líquidos newtonianos e 24,5% para líquidos não newtonianos contra os dados experimentais.

No ano 2013, foi elaborado um estudo sobre escoamento de bolhas dispersas utilizando o *Large Eddy Simulation* (LES). O escoamento de bolhas dispersas, envolve a modelação de uma interface gás-líquido, separação de fases, troca entre fases e modelação da turbulência. A LES encontra-se entre DNS (Direct Numerical Simulation) - que é uma abordagem sem modelação e resolve todas as escalas presentes na turbulência, no entanto não é muito prático para problemas que envolvem números de Reynolds muito elevados- e RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) - é mais viável; modela o tempo médio da velocidade através da viscosidade turbulenta ou pela modelação direta do Reynolds- em termos de fração de escalas. Há considerações a ter em conta para a modelação do escoamento de bolhas dispersas, como a separação de escalas de comprimento da interface, isto é, micro, meso e macroescala. A separação dessas escalas contribui para a seleção das Equações de Navier-Stokes para aplicação do modelo adequado para a situação de multifase.

De um modo geral o software ANSYS, permite simular o comportamento dos fluidos e analisar os resultados de forma confiável [166] [157]. Além dos softwares referidos anteriormente, o COMSOL [167] [168] e o OpenFOAM [169] são também usados para simular o mesmo tipo de problema..

2. OBJETIVOS

Os principais objetivos do presente trabalho são:

- i. Através da modelação matemática, determinar, parametrizar e validar experimentalmente, um sistema Pulse Air (pulsos de ar) num recipiente cilíndrico de estrutura octogonal de 2 metros de altura e 2,160 metros de diâmetro, para uma mistura de 1grama de *PolyGeo* por 1 litro de água da torneira (rácio 1:1) capaz de gerar um fluido:
 - com 90 s/quarto (viscosidade de cone de Marsh) em menos de 30 minutos;
 - homogéneo (em 4 amostras recolhidas de 500 ml, em profundidade, em pontos diferentes, o tempo de escoamento deve apresentar um desvio padrão, no máximo, de $\leq 0,3$ ml/s em cone de Marsh);
- ii. Através da modelação matemática, determinar, parametrizar e extrapolar, um sistema pulsair num recipiente cilíndrico de estrutura octogonal de 6 metros de altura e 2,160 metros de diâmetro, para uma mistura de 1grama de *PolyGeo* por 1 litro de água da torneira (rácio 1:1) capaz de gerar um fluido com 90 s/quarto (viscosidade de cone de Marsh) em menos de 30 minutos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Soda cáustica, água destilada, água da torneira, PolyGEO (pureza $\geq 99\%$, de Geosoil), Sistema Pulse Air, Cone e copo de Marsh, Compressor (capacidade 1400 L/min), Line Vac, fitas de pH, fitas de carbonato de cálcio e fitas de cloro, tanque cilíndrico em acrílico de dimensão 200 mm de diâmetro e 600 mm de altura, tanque cilíndrico de dimensões 2160 mm de diâmetro e 2000 mm de altura, tubo pneumático de 4 mm de diâmetro interno e de 1 polegada.

Na modelação numérica foi utilizado um computador com um processador Intel Core i7 – 7700K; CPU@4.20 GHz e RAM de 16 Gb e o software ANSYS 18.1 Académico com o solver Fluent.

Todos os ensaios de controlo durante este trabalho foram realizados utilizando água destilada. Foi mantido em todos os ensaios experimentais um pH entre 11 e 12, através da adição de soda cáustica.

3.2 Métodos

Para a realização do estudo experimental, partiu-se dos resultados dos parâmetros previamente estudados pelo Engenheiro António Cunha da empresa GEO, pelo que o trabalho experimental realizado em pequena escala é fundado nos seus resultados.

3.2.1 Mini Silo – Escala Laboratorial

Na presente secção são estudadas as variáveis número de pratos e tempo de paragem do pulso (TOff) do sistema Pulse Air e as velocidades de subida de bolhas, reproduzidas a partir das variáveis descritas anteriormente, são determinadas através de simulações computacionais. A comparação de velocidades de subida de bolha entre os resultados do pulse air e da simulação são apresentadas no final desta secção e ainda foi realizado um estudo relativamente à influência da temperatura na viscosidade e a variação da viscosidade em função da concentração de polímero. Deste modo, esta secção foi dividida num estudo experimental e computacional.

3.2.1.1 Experimentais

3.2.1.1.1 Estudo da variação da viscosidade em função da concentração do polímero em água utilizando o Pulse Air

Para estudar a variação da viscosidade em função da concentração do polímero PolyGEO utilizou-se o sistema de mistura Pulse Air (utilizado pela GEO para a mistura dos polímeros em laboratório) e representou-se a concentração do polímero em função da viscosidade obtida no cone de marsh. O Sistema Pulse Air foi operado da seguinte forma: (1) rodou-se a válvula que permite o fornecimento de ar, vindo do compressor; (2) regulou-se o regulador de pressão para o valor de 3,5 bar e um controlador que define o tempo de Pulso (TON) e paragem (TOFF), sendo este valor 0,1 segundos e 2 segundos, respetivamente.

Foi utilizado um tanque cilíndrico de dimensões 200 mm de diâmetro e 600 mm de altura, colocando no centro do tanque um prato acumulador com 100 mm de diâmetro. Utilizou-se para a alimentação pneumática do tanque, um tubo pneumático com diâmetro interno de 4 mm.

Na Tabela 3.1, encontram-se indicadas as quantidades de polímero utilizado em cada ensaio. Foram utilizados em todos os ensaios 4 litros de água destilada e um tempo de mistura de 30 minutos.

Tabela 3.1 Ensaio para avaliação da viscosidade versus concentração de polímero

Ensaio	Massa do Polímero (g)	Concentração de polímero (g/L)
1	2	0,50
2	3	0,75
3	4	1,00
4	5	1,25
5	6	1,50
6	7	1,75

Em cada ensaio realizado foi medida a viscosidade em cone de Marsh (3.2.1.1.5) e calculados os caudais de escoamento (3.2.1.1.6) de modo a ser obtida a homogeneidade do fluido.

3.2.1.1.2 Estudo da variável TOff do Sistema Pulse Air para um tanque de menores dimensões (200x600) mm

Para a experiência, foi utilizado um tanque de mistura de dimensões de 200 mm de diâmetro e 600 mm de altura. O tanque de dimensões (200x600) mm (Figura 3.1b), foi cheio com 4 litros de água (sendo utilizada água destilada para os ensaios de controlo e água da torneira nos restantes ensaios. Para os ensaios utilizando água da torneira, realizou-se uma análise aos sais presentes na água, quantificando a concentração de cloro e carbonato de cálcio.

Após o enchimento do tanque foram introduzidos os pratos acumuladores, sendo utilizados nos ensaios dois conjuntos de pratos: 1º conjunto - um prato acumulador de 100 mm de diâmetro (Figura 3.1a); 2º conjunto - 4 pratos acumuladores cada um com 40 mm de diâmetro (Figura 3.1 c). De seguida procedeu-se à alimentação de ar ao sistema, através da utilização de tubo pneumático de 4 mm de diâmetro interno e o fornecimento de ar foi realizado através de um compressor e válvulas. Foi seleccionada a pressão pretendida e definido os tempos de pulso (TOn) e o tempo de paragem dos pulsos (TOff). Foi adicionada à água presente no tanque 12,5 ml de soda cáustica de modo a se obter um pH do meio entre 11 e 12. Ligou-se o sistema Pulse Air e de seguida introduz-se o polímero PolyGeo, cerca de 4 gramas, no tanque com água, através do sistema Line Vac - Sistema que utiliza o efeito de Venturi - e após a aspersão do polímero, removeu-se o Line Vac do tanque.

Todos os ensaios realizados tiveram uma duração de 30 minutos, correspondendo ao tempo de mistura do objetivo.

Os ensaios de controlo durante este trabalho foram realizados utilizando água destilada.

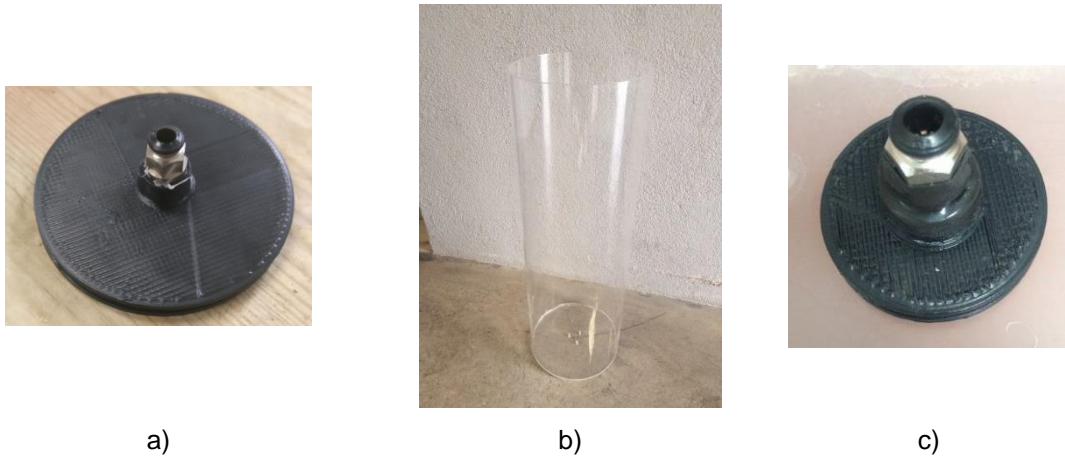


Figura 3.1 a) Prato de acumulação de 100 mm; b) tanque cilíndrico em acrílico de 200x600 mm; c) prato de acumulação de 40 mm

3.2.1.1.2.1 1 Prato de acumulação de 100 mm de diâmetro

O prato acumulador de 100 mm de diâmetro foi posicionado no centro do fundo do tanque (Figura 3.2) e foram realizados ensaios utilizando 1g de PolyGeo por litro de água. A água utilizada nos ensaios de controlo foi água destilada (Tabela 3.2) e nos restantes ensaios água da torneira (Tabela 3.3).



Figura 3.2 Tanque de (200x600) mm com prato de acumulação de 100 mm de diâmetro

Ao longo dos ensaios realizados experimentalmente foram manipulados os valores de TOff do sistema Pulse Air, TOff= 2 e 3 segundos

Para todos ensaios foi usado um espaçamento do prato acumulador de 2 mm e um diâmetro do tubo de 4 mm de diâmetro interno. Considerou-se também um sistema de introdução de polímero, Line Vac, a funcionar a uma pressão de 2 bar.

Tabela 3.2 Ensaios de controlo realizados no sistema Pulse Air para um prato com diâmetro de 100mm, variando o TOff e a Pressão do ar

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
7	0,1	2	3,5
8	0,1	3	3,5

Foram realizados ensaios utilizando água da torneira considerando as mesmas condições de operação do Pulse Air para os ensaios com água destilada.

Tabela 3.3 Ensaios realizados com água da torneira para um prato com diâmetro de 100 mm, variando o TOff e pressão do ar

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
9	0,1	2	3,5
10	0,1	3	3,5

No final de cada ensaio, para água da torneira e para a água destilada foi medida a viscosidade (3.2.1.1.5) e calculado o caudal de escoamento (3.2.1.1.6) do fluido polimérico.

3.2.1.1.2.2 4 Pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro

Os 4 pratos de acumulação de 40 mm foram posicionados no fundo do tanque, a uma distância de aproximadamente 50 mm do centro do tanque, estabelecendo um ângulo de 90° entre cada prato de acumulação (Figura 3.3).

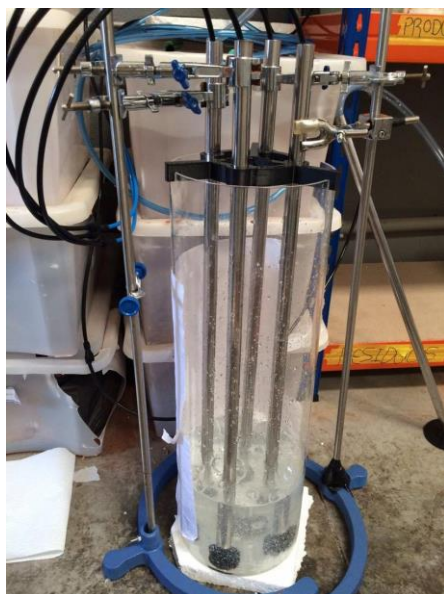


Figura 3.3 tanque de 200x600 mm com 4 pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro

Ao longo dos ensaios realizados experimentalmente foram manipuladas as variáveis do sistema Pulse Air, tempo de paragem do pulso de ar, TOff e repetiram-se para as mesmas condições operatórias entre água destilada (Tabela 3.4) e água da torneira (Tabela 3.5), seguidamente, foi aumentado o valor do TOff para 3, 4 e 5 segundos, utilizando apenas água da torneira (Tabela 3.5).

Para todos ensaios considerou-se um espaçamento do prato acumulador de 2 mm e um diâmetro do tubo de 4mm de diâmetro interno. Considerou-se também um sistema de introdução de polímero, Line Vac, a funcionar a uma pressão de 2 bar.

Tabela 3.4 Ensaio de controlo realizados no sistema Pulse Air para 4 pratos com diâmetro de 40 mm, variando o TOff e a Pressão do ar

Ensaio	TON (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
11	0,1	2	3,5

Foram realizados ensaios utilizando água da torneira considerando as mesmas condições de operação do Pulse Air para os ensaios com água destilada.

Tabela 3.5 Ensaio realizado com água da torneira para 4 pratos com diâmetro de 40 mm, variando o TOff e pressão do ar

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
12	0,1	2	3,5
13	0,1	3	3,5
14	0,1	4	3,5
15	0,1	5	3,5

No final de cada ensaio, para água da torneira e água destilada foi medida a viscosidade (3.2.1.1.5) e foram calculados os caudais de escoamento (3.2.1.1.6) da mistura polimérica.

3.2.1.1.3 Estudo da Influência da temperatura na viscosidade e homogeneidade de uma mistura polimérica

Nesta secção, foram realizados ensaios numa sala climatizada a 17°C, de forma a obter uma temperatura do fluido próximo de 19°C, utilizando o rácio de 1 grama de polyGeo por litro de água. Foi utilizado água destilada, 4 litros, e um tanque cilíndrico de 200x600 mm, de seguida adicionou-se 12,5 ml de hidróxido de sódio para se obter um pH da mistura entre 11 e 12. Foram definidas as condições operatórias do Pulse Air (Tabela 3.6). O sistema foi posto agitar durante 30 minutos.

3.2.1.1.3.1 1 Prato de acumulação de 100 mm de diâmetro

Realizaram-se os ensaios nas mesmas condições operatórias da secção 3.2.1.1.2.1, para a água destilada (Tabela 3.6)

Tabela 3.6 Ensaio - sala climatizada para 1 prato de acumulação e água destilada

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
16	19	17	0,1	2	3,5

No final do ensaio foi medida a viscosidade em cone de Marsh (3.2.1.1.5) e foram calculados os caudais de escoamento (3.2.1.1.6) de modo a ser obtida a homogeneidade do fluido.

Os resultados destes ensaios foram posteriormente comparados com os resultados dos ensaios realizados à temperatura ambiente no laboratório.

3.2.1.1.3.2 4 Pratos de acumulação de 40 mm de diâmetro

Realizaram-se os ensaios nas mesmas condições operatórias da secção 3.2.1.1.2.2 para a água destilada (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 Ensaio - sala climatizada para 4 pratos de acumulação de 40 mm e água destilada

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
17	19	17	0,1	2	3,5

No fim do ensaio foi medida a viscosidade em cone de Marsh (3.2.1.1.5) e os caudais de escoamento (3.2.1.1.6) de modo a ser obtida a homogeneidade do fluido.

O resultado do ensaio foi posteriormente comparado com os resultados dos ensaios realizados à temperatura ambiente no laboratório.

3.2.1.1.4 Estudo da velocidade de subida de uma bolha

Foram realizadas no tanque cilíndrico de pequena escala de 200 mm de diâmetro e 600 mm de altura, várias medições onde se registou o tempo de subida de uma bolha quando esta percorre uma distância de 200 mm, antes e depois da adição do polímero PolyGEO. Utilizou-se um prato acumulador de 100 mm de diâmetro e 2 pratos de 40 mm de diâmetro, encheu-se o tanque com 12 litros de água destilada e operou-se o Pulse Air de acordo com as seguintes condições, presentes na Tabela 3.8. As condições apresentadas permitem introduzir um caudal de ar necessário para a formação de bolha com 0,5 e 1 litro de volume.

Tabela 3.8 Parâmetros operacionais do sistema Pulse Air para o estudo da velocidade de subida de uma bolha

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)	Volume de bolha (L)
18	0,1	2	3,5	1
19	0,1	2	3,5	0,5

Registaram-se cinco medições, ou seja, tempos de subida da bolha, utilizando uma câmara de filmagem com 120 fps (*frames per second*), para uma distância de subida de 200 mm. Após o registo, adicionaram-se ao tanque 12 gramas do polímero PolyGEO, utilizando o sistema Line-Vac a 2 bar e ao fim de 30 min de agitação com o sistema Pulse Air, foi registado o tempo de subida da bolha, utilizando a mesma câmara de gravação do procedimento anterior.

3.2.1.1.5 Medição da viscosidade

A viscosidade foi determinada sempre depois de cada ensaio. Após a mistura do polímero em água, que foram misturados pelo sistema Pulse Air durante 30 minutos, retiraram-se quatro amostras de mistura de polímero do tanque e mediu-se a viscosidade dessas amostras,

utilizando o funil e copo de Marsh, observando-se o tempo que o fluido demora a escoar para o copo de Marsh (Figura 3.4).



Figura 3.4 Medição da viscosidade utilizando o funil e copo de Marsh

3.2.1.1.6 Determinação da homogeneidade

Após a realização de cada ensaio, para além da viscosidade foi determinada a homogeneidade da mistura polimérica através do viscosímetro de Marsh.

A partir dos resultados das viscosidades da secção 3.2.1.1.5, calculou-se o caudal da mistura polimérica através da equação:

$$Caudal \left(\frac{mL}{s} \right) = \frac{Volume (mL)}{tempo (s)}$$

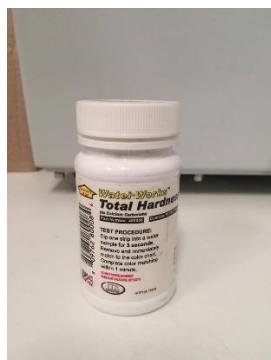
Em que o volume corresponde ao volume do copo de Marsh (1 quarto=946,4 ml).

$$\sigma = \sqrt{\frac{(C_1 - \bar{C})^2 + (C_2 - \bar{C})^2 + (C_3 - \bar{C})^2 + (C_4 - \bar{C})^2}{N}}$$

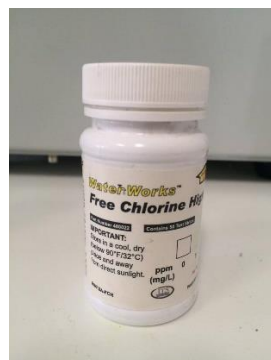
Em que C_1 , C_2 , C_3 e C_4 (ml/s) são os 4 caudais de escoamento medidos para as diferentes frações retiradas (da solução de PolyGEO), N é o número de amostras e \bar{C} é a média dos caudais obtidos, sendo sempre igual a 4 neste trabalho.

3.2.1.1.7 Análise de sais presentes na água

De modo a determinar as quantidades de sais presentes na água da torneira, foram realizadas medições do teor de carbonato de cálcio e cloro livre. Utilizaram-se para tais medições, fitas de carbonato de cálcio e fitas de cloro, ver Figura 3.5. Foi introduzida cada fita dentro de água da torneira e registou-se o valor correspondente a cor da fita.



a)



b)

Figura 3.5 a) Fitas de carbonato de cálcio; b) fitas de cloro

3.2.1.1.8 Determinação das constantes da lei da potência

Para ser possível a realização da simulação do comportamento de um fluido não newtoniano no programa de análise CFD, Ansys Fluent, foi necessário determinar as constantes da lei da potência, k (índice de consistência) e n (índice de comportamento do fluido), utilizou-se o viscosímetro de Brookfield DV2TLV Extra com o spindle ULA (0), e operou-se o sistema seguindo os passos. Introduziu-se a amostra de solução polimérica (que se utiliza nos ensaios com o Pulse Air) no recipiente até cobrir o spindle e fez-se variar a velocidade do spindle de acordo com a Tabela 3.9, durante 5 minutos e de 5 em 5 minutos, mantendo a percentagem de torque entre 25% e 75%.

Tabela 3.9 Velocidade de rotação do Spindle ULA(0)

Velocidade do Spindle (rpm)
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
5

De seguida registaram-se da experiência os valores das viscosidades e da taxa de deformação angular para cada velocidade de rotação do spindle.

3.2.1.2 Simulações

Nesta secção, foram efetuadas várias simulações/ análises CFD a um escoamento multifásico ar-líquido, sendo que o líquido é representado pela água, enquanto fluido newtoniano e a mistura polimérica, o fluido não newtoniano. Para as simulações realizadas com um fluido não newtoniano foram utilizados os valores dos parâmetros calculados na secção 3.2.1.1.8.

As simulações foram realizadas recorrendo-se ao solver do ANSYS, o Fluent e utilizando um computador com processador, Intel Core i7-7700K CPU@4.20GHz com RAM 16Gb.

Para a realização de uma simulação CFD seguem-se os seguintes passos:

**Adicionar Geometria → Introduzir a Grelha (“mesh”) → Introduzir Inputs do Fluent →
Definir critérios de paragem**

Os resultados são apresentados numa janela, o CFD-Post, onde se encontram os resultados da simulação em forma de perfis, como vetores, e contornos.

3.2.1.2.1 Comparação de modelos multifásicos e turbulência na simulação

Foram realizados alguns ensaios em que se variou o modelo multifásico e de turbulência de modo a entender o que melhor se adequa ao presente trabalho. Assim correu-se uma simulação para uma bolha, da mesma forma que a secção 3.2.1.2.2 e realizaram-se os seguintes ensaios com os seguintes modelos:

Tabela 3.10 Ensaios de simulação com comparação de modelos de turbulência

Ensaio	Modelos Multifásico	Modelo de Turbulência
20	Mixture	k-epsilon Standard
21	VOF	k-epsilon Standard
22	VOF	k-omega Standard
23	VOF	k-epsilon Realizable

3.2.1.2.2 Simulação CFD de uma bolha de ar em 3D com superfície livre

Para a realização da simulação é importada uma geometria do tanque em 3D, realizada em SolidWorks, de seguida é criada uma “mesh”, com 56240 elementos, para posterior análise. Na fase do “Setup” é utilizado o “pressure based solver”, em estado transiente e tem-se em conta o efeito da aceleração gravítica no eixo dos yy’s. De seguida são selecionados os modelos, sendo utilizado nesta simulação o modelo multifase VOF (“Volume of Fluid”) e um modelo de turbulência k-epsilon Standard. Após o passo anterior foram selecionados os tipos de materiais. No presente trabalho, a água (no caso de se estar a simular um fluido newtoniano) é definida como fase primária (líquido) e o ar como fase secundária, e as propriedades físicas da água e do ar são apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de uma bolha

Fase	Fluido	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (Pa.s)
Primária	Água	998,20	1x10 ⁻³
Primária	Fluido não newtoniano	998,20	Não newtoniano - lei da potência
Secundária	Ar	1,23	1,79x10 ⁻⁵

Para um fluido não newtoniano é necessário em “Viscous Model” selecionar a opção “Scalable Wall Function” e colocar a opção “Scalable Wall Functions”. De seguida insere-se na linha de comando (“Console”) a seguinte sequência de comandos:

```
define/models
define/models/>viscous
/define/models/viscous>turbulence-expert/turb-non-newtonian
Enable turbulence for non-Newtonian Fluids? [no] yes
/define/models/viscous/turbulence-expert>
```

E selecionar nos materiais a opção “Non-newtonian Power-Law” e colocar os seguintes valores dos parâmetros, ver Tabela 3.12.

Tabela 3.12 Parâmetros da lei da potência introduzidos no Fluent, para simular um fluido não newtoniano

Parâmetros da lei da potência	
Índice de consistência, k (kg.sⁿ⁻²/m)	0,27
Índice da lei da potência, n	0,39
Limite mínimo de viscosidade (kg/ms)	0,07
Limite máximo de viscosidade (kg/ms)	0,37

Foi definida uma região para a bolha de dimensão de 62 mm através da ferramenta “Adapt”, “Mark/Adapt Cells” e foi definida uma superfície livre com 100 mm de raio e uma altura de 200mm (desde 400 mm a 600 mm). Em “Patch” foi definida a fase onde é aplicado o modelo VOF, este foi aplicado à fase secundária. Por ultimo são definidos os passos da iteração, em que o tamanho do número de passos (“time -step number”) é 0,01 e o número de passos (“number of time-steps”) são 300.

No CFD-Post são fornecidos os resultados da simulação. Estes são obtidos em forma de gráficos de contorno e vetores. Os perfis de densidade ou velocidade permitem obter através de um código de cores, a localização dos dois fluidos (ar e água) presentes no escoamento e o valor

da velocidade em cada ponto. Por outro lado, os campos de vetores fornecem a indicação da direção do escoamento do fluido em vários pontos.

A presente simulação foi realizada para os seguintes sistemas multifásicos:

Tabela 3.13 Ensaio de simulação para uma bolha 2D

Ensaio	Sistema Multifásico
24	Ar + água
25	Ar + fluido não newtoniano

3.2.1.2.3 Simulação CFD de 4 bolhas de ar em 3D com superfície livre

Para a realização da simulação é importada uma geometria do tanque em 3D, realizada em SolidWorks, de seguida é criada uma “mesh”, com 56240 elementos, para posterior análise. Na fase do “Setup” é utilizado o “pressure based solver”, em estado transiente e tem-se em conta o efeito da aceleração gravítica no eixo dos yy’s. De seguida são seleccionados os modelos, sendo utilizado nesta simulação o modelo multifase VOF (“Volume of Fluid”) e um modelo de turbulência k-epsilon Standard. Após o passo anterior foram seleccionados os tipos de materiais. No presente trabalho, a água (no caso de se estar a simular um fluido newtoniano) é definida como fase primária (líquido) e o ar como fase secundária, e as propriedades físicas da água e do ar são apresentadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de 4 bolhas

Fase	Fluido	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)
Primária	Água	998,20	1,00x10 ⁻³
Primária	Fluido não newtoniano	998,20	Não newtoniano - lei da potência
Secundária	Ar	1,23	1,79x10 ⁻⁵

Para um fluido não newtoniano é necessário em “viscous model” seleccionar a opção “Scalable Wall Function” e colocar a opção “Scalable Wall Functions”. De seguida insere-se na linha de comando (“Console”) a seguinte sequência de comandos:

```
define/models
define/models/>viscous
/define/models/viscous>turbulence-expert/turb-non-newtonian
Enable turbulence for non-Newtonian Fluids? [no] yes
/define/models/viscous/turbulence-expert>
```

E seleccionar nos materiais a opção “Non-newtonian Power-Law” e colocar os seguintes valores dos parâmetros, como na secção 3.2.1.2.2.

Parâmetros da lei da potência	
Índice de consistência, k ($\text{kg.s}^{n-2}/\text{m}$)	0,27
Índice da lei da potência, n	0,39
Limite mínimo de viscosidade (kg/ms)	0,07
Limite máximo de viscosidade (kg/ms)	0,37

Foi definida uma região para a bolha de dimensão de 40 mm através da ferramenta “Adapt”, “Mark/Adapt Cells” e foi definida uma superfície livre com 100 mm de raio e uma altura de 200mm (desde 400 mm a 600 mm). Em “Patch” foi definida a fase onde é aplicado o modelo VOF, este foi aplicado à fase secundária. Por ultimo são definidos os passos da iteração, em que o tamanho do número de passos (“time -step number”) é 0,01 e o número de passos (“number of time-steps”) são 300.

No CFD-Post são fornecidos os resultados para a simulação, estes são obtidos através de gráficos de contorno e vetores. Os perfis de densidade ou velocidade permitem obter através de um código de cores, a localização dos dois fluidos (ar e água) presentes no escoamento e o valor da velocidade em cada ponto. Por outro lado, os campos de vetores fornecem a indicação da direção do escoamento do fluido em vários pontos.

A presente simulação foi realizada para os seguintes sistemas multifásicos:

Tabela 3.15 Ensaio de simulação para 4 bolhas

Ensaio	Sistema Multifásico
26	Ar+ água
27	Ar + fluido não newtoniano

3.2.2 Scale Up

3.2.2.1 Experimental

3.2.2.1.1 Validação Experimental de um Sistema Pulse Air para um tanque de (2160x2000) mm utilizando um prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro

Para a realização do scale up foi utilizado um tanque com dimensões, 2160 mm de diâmetro e 2000 mm de altura e utilizado um prato acumulador de 1080 mm de diâmetro. Foi utilizado um reservatório extra de modo a possibilitar o fornecimento de ar necessário ao sistema e um tubo pneumático (de injeção de ar nos pratos) de uma polegada.

Foi colocado o prato de 1080 mm de diâmetro no fundo do tanque e posicionado no centro do tanque, utilizando pesos de forma a mantê-lo estável no fundo do tanque (Figura 3.6). O prato de acumulação foi dimensionado de modo a ocupar cerca de 50% do fundo do tanque e a deixar 540 mm de distância das paredes do tanque.

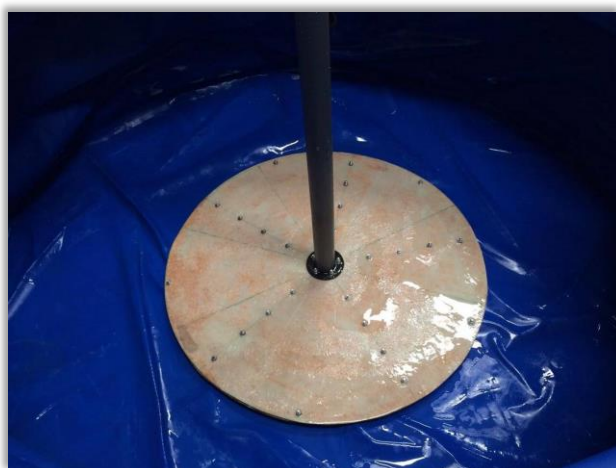


Figura 3.6 Prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro instalado no fundo do tanque

De seguida foram introduzindo no tanque 2000 litros (2 m^3), volume de água sugerido pela GEO e 2 kg de polímero PolyGEO (rácio 1:1). A alimentação da água ao tanque foi introduzida pela superfície do tanque e de seguida procedeu-se à análise dos sais de cloro livre e carbonato de cálcio. Foram utilizados 625 gramas de soda cáustica para estabelecer uma solução polimérica com pH entre 11 e 12.

A introdução de polímero foi realizada através do Line-Vac, dimensionado para a introdução do polímero no tanque de grandes dimensões (2160 mm de diâmetro e 2000 mm de altura). Na Figura 3.7, estão representados os dois Line-Vac's utilizados para a introdução do polímero PolyGEO nos dois tanques: Mini Silo (Figura 3.7 b) e no tanque de Scale Up (Figura 3.7 a)

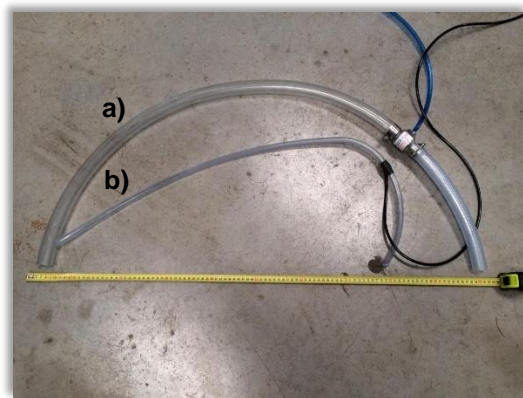


Figura 3.7 Line-Vac's utilizados: a) Scale Up; b) Mini Silo- Escala Laboratorial

Foram utilizadas as melhores condições operacionais do Pulse Air obtidas no mini silo e para os restantes ensaios variou-se o tempo do pulso (TOn) e o tempo de paragem do pulso (TOff), de acordo com a Tabela 3.16.

Tabela 3.16 Ensaio de scale up realizados com água da torneira para 1 prato com diâmetro de 1080 mm, variando o TOff e pressão do ar

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)
28	0,1	3	3,5
29	0,3	3	3,5
30	0,1	2	3,5

Foram medidas as viscosidades (3.2.1.1.5) e calculados os caudais de escoamento (3.2.1.1.6) para cada ensaio, retirando as amostras de mistura polimérica em pontos diferentes do tanque, de acordo com a Figura 3.8.

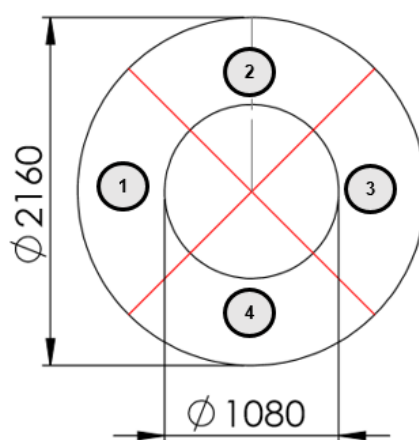


Figura 3.8 Zonas de tiragem de amostras no tanque: (1) amostra da superfície; (2) amostra do fundo do tanque; (3) amostra da superfície; (4) amostra do fundo do tanque

3.2.2.2 Simulações

Para a realização da simulação é importada uma geometria do tanque em 3D, realizada em SolidWorks, de seguida é criada uma “mesh”, com 56240 elementos, para posterior análise. Na fase do “Setup” é utilizado o “pressure based solver”, em estado transiente e tem-se em conta o efeito da aceleração gravítica no eixo dos yy’s. De seguida são seleccionados os modelos, sendo utilizado nesta simulação o modelo multifase VOF (“Volume of Fluid”) e um modelo de turbulência k-epsilon Standard. Após o passo anterior foram seleccionados os tipos de materiais. No presente trabalho, a água é definida como fase primária (líquido) e o ar como fase secundária, e as propriedades físicas da água e do ar são apresentadas na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 Propriedades físicas do líquido e gás na simulação de uma bolha

Fase	Fluido	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (Pa.s)
Primária	Água	998,20	1x10 ⁻³
Secundária	Ar	1,23	1,79x10 ⁻⁵

Foi definida uma região para a bolha de dimensão de 307 mm através da ferramenta “Adapt”, “Mark/Adapt Cells” e foi definida uma superfície livre com 1080 mm de raio e uma altura de 3000 mm (desde 3000 mm a 6000 mm). Em “Patch” foi definida a fase onde é aplicado o modelo VOF, este foi aplicado à fase secundária. Por ultimo são definidos os passos da iteração, em que o tamanho do número de passos (“time -step number”) é 0,01 e o número de passos (“number of time-steps”) são 300.

No CFD-Post são fornecidos os resultados para a simulação, estes são obtidos através de gráficos de contorno e vetores. Os perfis de densidade ou velocidade permitem obter através de um código de cores, a localização dos dois fluidos (ar e água) presentes no escoamento e o valor da velocidade em cada ponto. Por outro lado, os campos de vetores fornecem a indicação da direção do escoamento do fluido em vários pontos.

Foi realizada a simulação para o sistema multifásico, ver Tabela 3.18:

Tabela 3.18 Ensaio de simulação para uma bolha

Ensaio	Sistema Multifásico
31	Ar+ água

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A mistura do polímero PolyGEO em água foi estudada utilizando para a realização da mistura um sistema utilizando pulsos de ar - Sistema Pulse Air - de modo a obter um fluido polimérico que apresentasse um valor de viscosidade igual ou superior a 90 s/quarto ao fim de 30 minutos e que fosse homogêneo, apresentando um tempo de escoamento cujo desvio padrão fosse menor ou igual a 0,3 ml/s.

Os testes de controlo foram realizados, de forma a se obter um valor de viscosidade máxima, capaz de ser atingido pelo polímero após a sua total dissolução e hidratação. Neste sentido, foi utilizada água destilada para os ensaios de controlo. Na realização dos ensaios utilizando água da água da torneira foi realizada uma análise à concentração de sais de cloro livre (Cl-) e carbonato de cálcio (CaCO₃), obteve-se para todos os ensaios realizados uma concentração de cloro de 0 ppm e de 120 ppm de carbonato de cálcio. Os sais presentes na água bloqueiam as cargas e os centros ativos ficam menos disponíveis, diminuindo a ligação polímero água e possibilitando uma redução da viscosidade, sendo importante a sua medição.

4.1 Mini Silo – Escala Laboratorial

4.1.1 Resultados Experimentais

4.1.1.1 Viscosidade versus variação da concentração de polímero

Foi realizado um estudo ao fluido polimérico de forma a entender como varia a viscosidade com a concentração de polímero. Para tal, fez-se variar a concentração de polímero, para um mesmo volume de água destilada (4 litros), utilizando o sistema pulse Air nas condições operacionais, TOn em 0,1 segundos, TOff a 2 segundos e a pressão do sistema a 3,5 bar, em agitação durante 30 minutos. A concentração foi variada de acordo com a Tabela 4.1.

Pelos engenheiros da GEO, sabe-se que existe uma relação empírica (Equação 4.1) entre a viscosidade e a concentração de polímero.

$$\text{Viscosidade calculada} = 26,5 + (63,5 \times \text{concentração do polímero}) \quad (4.1)$$

Em que, a viscosidade calculada é representada em unidade s/quarto, a concentração de polímero em g/L e o valor 26,5 ml/s, corresponde à viscosidade da água.

Os valores das viscosidades experimentais e calculadas, juntamente com o desvio padrão ao tempo de escoamento experimental são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios da viscosidade em função da concentração de polímero

Ensaio	Concentração de polímero (g/L)	Viscosidade Experimental (s/quarto)	Desvio padrão (ml/s)	Viscosidade calculada (ml/s)	Erro relativo à viscosidade (%)
1	0,5	58,25	0,23	58,25	0
2	0,75	68,50	0,23	74,13	8
3	1	84,00	0,34	90,00	7
4	1,25	98,75	0,31	105,88	7
5	1,5	111,50	0,12	121,75	8
6	1,75	124,25	0,13	137,63	10

Por observação da Figura 4.1, os dados apontam para um crescimento da viscosidade em função do aumento de concentração do polímero, no entanto também é possível observar que os valores de viscosidade experimental obtidos para uma concentração de polímero de 0,5 g/L, são iguais aos valores da viscosidade calculada. À medida que a concentração de polímero aumenta, maior é a discrepância entre os valores experimentais e calculados. Uma possível explicação para este fato é a dificuldade na dissolução e hidratação do polímero, como os ensaios 4 e 5, em que o desvio padrão relativo ao tempo de escoamento é maior que 0,3 ml/s. Para além de maior probabilidade de ocorrerem “fish-eyes”, uma vez que há mais quantidade de polímero a ser introduzido para o tanque para a mesma quantidade de solvente.

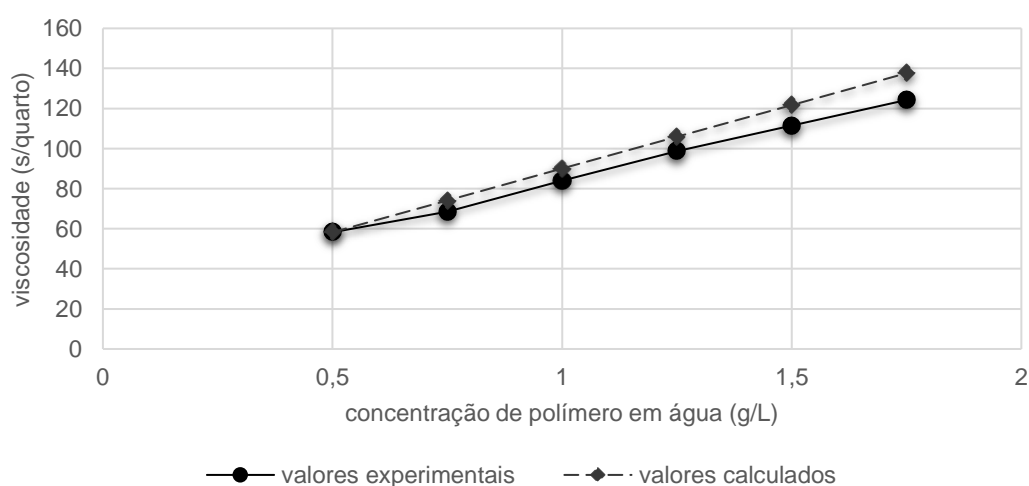


Figura 4.1 Representação gráfica dos valores de viscosidade experimental e calculada em função da concentração de polímero em água

4.1.1.2 Variável TOff

4.1.1.2.1 1 Prato de 100 mm de diâmetro

De acordo com o trabalho realizado por um engenheiro da GEO, sabe-se que as condições operacionais para cumprir o objetivo seriam (para 1 prato de 100 mm): TOn de 0,1 segundos; TOff de 2 segundos e pressão de 3,5 bar. Deste modo, foram replicados os ensaios (4 réplicas) e foi efetuada a média desses resultados, de forma a obter a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Resultados para um TOff de 2 segundos, para água destilada e da torneira

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	Água (4L)	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão ≤ 0,3 ml/s
7	24,9	26,5	Destilada	90±4,6	0,17±0,03	✓
9	24,9	27	Torneira	85±1,7	0,20±0,03	x

✓ - cumpre o objetivo

x - não cumpre o objetivo

Observa-se que para as condições operatórias do Pulse Air para TOn de 0,1 segundos, TOff de 2 segundos e pressão do sistema de 3,5 bar, os valores da viscosidade e desvio padrão do objetivo são atingidos, utilizando água destilada.

Após verificar que utilizando um TOff de 2 segundos foi obtido uma viscosidade de 85 s/quarto, ficando a 5 segundos do objetivo, 90 s/quarto, procedeu-se ao aumento do TOff para 3 segundos.

Realizando os ensaios utilizando um TOff igual a 3 segundos, um TOn de 0,1 segundos e uma Pressão de 3,5 bar, obtiveram-se os seguintes resultados de viscosidade e desvio padrão à viscosidade (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Resultados para um Toff de 3 segundos, para a água destilada e da torneira

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	Água (4L)	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão ≤ 0,3 ml/s
8	25,8	29,7	Destilada	91±4,7	0,07±0,05	✓
10	25,3	26,1	Torneira	92±1,8	0,19±0,09	✓

✓ - cumpre o objetivo

x - não cumpre o objetivo

Verifica-se que utilizando um TOff de 3 segundos, a experiência cumpre os objetivos de viscosidade e homogeneidade (viscosidade de pelo menos 90 s/quarto e homogeneidade com um desvio padrão menor ou igual a 0,3 ml/s) para a água destilada e da torneira.

Os resultados obtidos na Tabela 4.3, constataam que a melhor combinação foi a utilização de um prato de 100 mm de diâmetro e um TOff de 3, utilizando uma pressão de 3,5 bar, sendo obtida uma viscosidade de 92 s/quarto e um desvio padrão à homogeneidade de 0,19 ml/s.

4.1.1.2.2 4 Pratos de 40 mm de diâmetro

Para o sistema Pulse Air utilizando 4 pratos de acumulação de 40 mm, foram realizados ensaios com água destilada e água da torneira (4 repetições cada), utilizando um TOff de 2 segundos e manteve-se a pressão nos 3,5 bar para a viscosidade e desvio padrão (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4 Resultados para um TOff=2 segundos, utilizando 4 pratos

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	Água (4L)	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão ≤ 0,3 ml/s
11	24,7	27,5	Destilada	93±3,9	0,17±0,09	✓
12	24,0	26,6	Torneira	82±6,8	0,25±0,10	x

✓ - cumpre o objetivo

x - não cumpre o objetivo

De acordo com a Tabela 4.4, quando utilizado um sistema Pulse Air com 4 pratos de acumulação e um TOff de 2 segundos, observa-se que utilizando água destilada o objetivo é cumprido, obtendo-se uma viscosidade de 93 s/quarto e uma homogeneidade com desvio padrão igual a 0,17 ml/s, no entanto o mesmo não se verifica quando é utilizada água da torneira no ensaio, ficando a 8 segundos do objetivo, com 82 s/quarto. Mais se acrescenta que no caso da utilização de 4 pratos acumuladores, observa-se que algum polímero (não quantificável) é desperdiçado, sendo acumulado junto das paredes do tanque e dos tubos de injeção de ar, pelo que o baixo valor de viscosidade pode ser por esse motivo.

Tabela 4.5 Resultados para um TOff de 3, 4 e 5 segundos, para água da torneira, utilizando 4 pratos

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	TOff (s)	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão ≤ 0,3 ml/s
13	25,7	29	3	86	0,11	x
14	24,6	27	4	89	0,29	x
15	25,3	27,5	5	81	0,22	x

✓ - cumpre o objetivo

x - não cumpre o objetivo

Visto que, para um TOff de 2 segundos o objetivo não foi cumprido para a água da torneira e uma vez que ao utilizar um TOff de 3 segundos no sistema Pulse Air com um prato de 100 mm o objetivo foi atingido, os 90 s/quarto de viscosidade e perfeitamente homogêneo, repetiu-se o mesmo ensaio, mas utilizando 4 pratos de acumulação (Tabela 4.5) e foi obtida uma viscosidade de 86 s/quarto, 3 segundos superior ao ensaio utilizando um TOff de 2 segundos. De seguida foi realizado o ensaio tendo em conta um TOff de 4 segundos, onde foi obtida uma viscosidade de 89 s/quarto, mais 3 segundos que o ensaio anterior. Ao aumentar o TOff para 5 segundos verificou-se que a viscosidade diminui em 8 segundos, pelo que os dados apontam para que o

sistema em pequena escala só deve ser operado, utilizando no máximo um TOff de 4 segundos, pois utilizando um TOff superior o fluido começa a baixar a viscosidade.

4.1.1.3 Influência da temperatura na viscosidade e homogeneidade de uma mistura polimérica

Após comparar alguns resultados obtidos pelo Engenheiro da GEO para a mesma mistura polimérica e utilizando o sistema de mistura – Pulse Air – verificou-se que para as mesmas condições (TON=0,1 segundos; TOff= 2 segundos e Pressão= 3,5 bar), mas alturas diferentes de realização dos ensaios (final do Inverno e início do Verão) (ver Tabela 4.6), resultava em menores valores de viscosidade, pelo que foi avaliada a influência da temperatura na viscosidade do polímero PolyGEO em água, neste caso utilizando água destilada. Os resultados das viscosidades, utilizando 1 e 4 pratos acumuladores, em função da temperatura do fluido a 19 °C e 25 °C são apresentados na Tabela 4.7 e Figura 4.2.

Tabela 4.6 Resultados obtidos pelo Engenheiro da GEO para uma temperatura do ar de 20°C

Viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão $\leq 0,3$ ml/s
160	0,61	x
102	0,37	x
108	0,42	x

✓ - cumpre o objetivo

x - não cumpre o objetivo

De um modo geral, verifica-se (Figura 4.2) que ao reduzir 6°C na temperatura do fluido (de 25°C para 19°C) a viscosidade aumenta cerca de 24 s/quarto, na utilização de um prato de acumulação e cerca de 33 s/quarto quando utilizado 4 pratos de acumulação. No entanto menores valores de temperatura podem provocar dificuldades na dissolução do polímero e aumentar o desvio padrão relativo ao tempo de escoamento, provocando uma pior homogeneidade. No ensaio 17 (ver Tabela 4.7) é possível observar que para uma temperatura de fluido de 19°C, a viscosidade é de 127s/quarto e o desvio padrão relativo à homogeneidade é de 0,32 ml/s.

Tabela 4.7 Resultados obtidos na comparação dos valores de viscosidade e homogeneidade para uma temperatura de 19 e 25°C, para 1 e 4 pratos de acumulação

Ensaio	T _{fluido} (°C)	T _{ar} (°C)	Nº pratos	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)
16	19	17	1	114±4,6	0,25±0,03
17	19	17	4	127±3,9	0,32±0,09
7	25	26	1	90±4,6	0,19±0,03
11	25	26	4	93±3,9	0,17±0,09

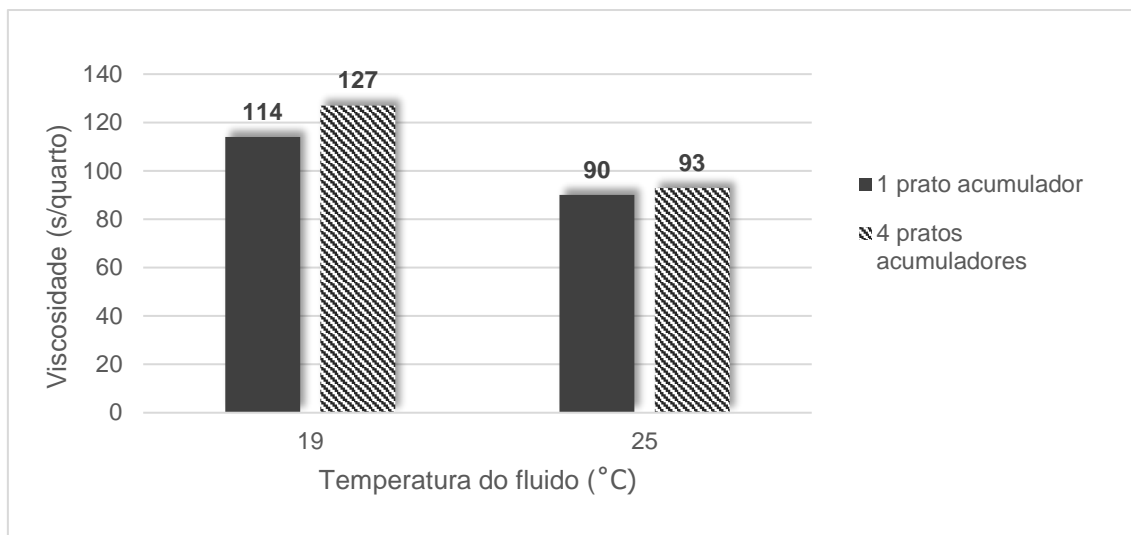


Figura 4.2 Comparação de resultados de viscosidade e temperaturas para 1 e 4 pratos acumuladores

De acordo com a Figura 4.2, é possível verificar que para uma redução da temperatura em 6°C é possível aumentar a viscosidade, em média, 24 s/quarto.

4.1.1.4 Velocidade de subida de uma bolha de ar

Foi estudada a velocidade de subida de uma bolha, através da utilização do sistema Pulse Air. O sistema Pulse Air foi operado utilizando um prato de 100 mm de diâmetro e 2 pratos de 40 mm de diâmetro com TOn, TOff e pressão de 0,1 segundos, 3 segundos e uma pressão de 3,5 bar. As condições selecionadas, anteriormente, para operar o Pulse Air, nomeadamente o valor do TOn e a pressão permitiram obter volumes de bolha de valores: 0,5 litros e 1 litro (Tabela 4.8). O valor da variável TOff não interferiu neste estudo.

Tabela 4.8 Parâmetros operacionais para o estudo da velocidade de subida da bolha para 1 e 0,5 L de ar

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)	Volume de bolha (L)
18	0,1	2	3,5	1
19	0,1	2	3,5	0,5



a)



b)



c)



d)

Figura 4.3 Sistema Pulse Air com libertação de bolhas a) bolha de 0,5 L em água; b) bolha 0,5 L em água + PolyGEO; c) bolha de 1 L em água; d) bolha de 1 L em água + PolyGEO

A Figura 4.3, mostra as bolhas de 0,5 e 1 litro de ar em água e água + PolyGEO, através de uma camara foi possível registrar o tempo de subida da bolha para um deslocamento de 200 mm, partindo o registo do meio do tanque até à superfície do líquido.

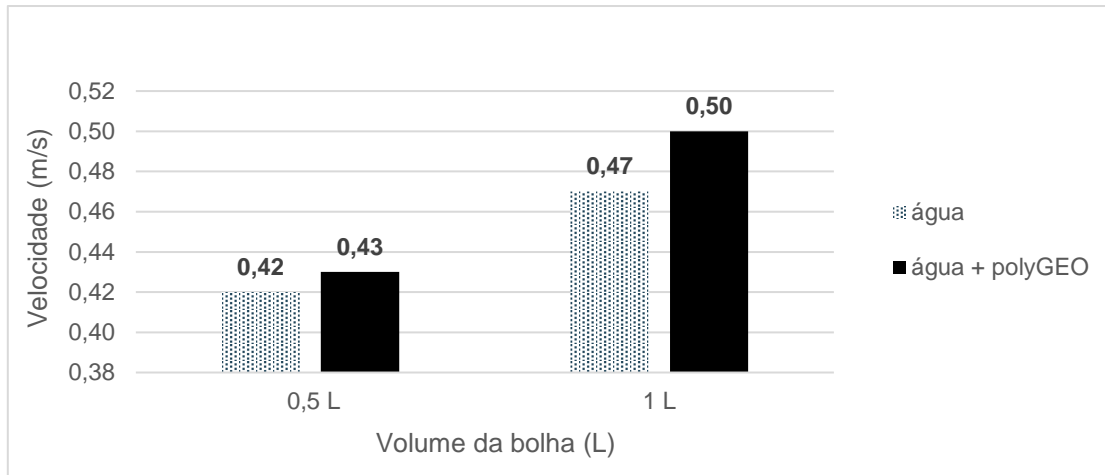


Figura 4.4 Representação gráfica da velocidade em função do volume de bolha com água e água + PolyGEO

Através da Figura 4.4, é possível verificar que quando o volume de bolha aumenta, a velocidade de subida da bolha aumenta, ou seja, é mais rápida para um volume maior de bolha [170]. Os resultados mostram também que os valores de velocidade não diferem muito quando o fluido passa de newtoniano para não newtoniano, uma vez que a densidade se mantém a mesma (densidade para a água e fluido polimérico igual a $0,99 \text{ g/cm}^3$).

4.1.1.5 Constantes da lei da potência k e n

A presente secção tem como objetivo a determinação das constantes da lei da potência, k , índice de consistência e n , correspondendo ao índice de comportamento do fluido, de modo a permitir a simulação de um fluido não newtoniano na simulação através do solver Fluent da Ansys.

Para fluidos não newtonianos de comportamento pseudoplástico ($n < 1$) existe variação da viscosidade com a taxa de deformação angular, diminuindo a viscosidade com o aumento da taxa de deformação angular (Figura 4.5)

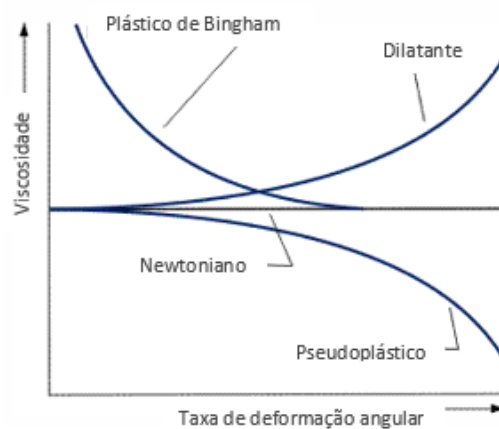


Figura 4.5 Comportamento dos fluidos de acordo com a viscosidade versus taxa de deformação angular. Adaptado de [54]

Inicialmente um fluido pseudoplástico exhibe um comportamento newtoniano (em que a viscosidade é praticamente constante, para baixos valores de taxa de deformação angular (Figura 4.5). À medida que a taxa de deformação angular aumenta ocorre a diminuição da viscosidade do fluido, esta relação é estabelecida através da “lei da potência”, uma vez que esta expressão, Equação 4.2, demonstra a relação entre a viscosidade e a taxa de deformação angular como uma potência.

$$\mu = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.2)$$

Onde, μ é a viscosidade (mPa.s), k é o índice de consistência (Pa.sⁿ), n é o índice do comportamento do fluido (adimensional) e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação angular (s⁻¹).

Aplicando a função logarítmica em ambos os lados da Equação 4.2, obtém-se:

$$\log(\mu) = \log(k) + (n - 1) \cdot \log(\dot{\gamma}) \quad (4.3)$$

Em que $(n - 1)$ representa o declive do gráfico da viscosidade em função da taxa de deformação angular, e $\log(k)$ o ponto em que a reta intersecta o gráfico (sendo k o valor da viscosidade quando a taxa de deformação angular é zero).

Tal como foi referido na secção 3.2.1.9, para determinar os parâmetros acima descritos, utilizou-se o viscosímetro de Brookfield e o spindle ULA (0), alterando os parâmetros de velocidade de rotação (ver Tabela 4.9) do spindle de 5 em 5 minutos.

Da experiência do viscosímetro de Brookfield obtém-se os seguintes resultados, representados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Resultados obtidos pelo viscosímetro de Brookfield

Velocidade do Spindle (rpm)	Torque (%)	Viscosidade (cP)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação angular (s⁻¹)
0,5	30,90	370,80	0,37	0,61
1	36,90	221,40	0,22	1,22
1,5	46,50	186,00	0,19	1,84
2	51,10	153,30	0,15	2,45
2,5	56,50	135,60	0,14	3,06
3	60,80	121,60	0,12	3,67
3,5	64,50	110,60	0,11	4,28
4	67,70	101,50	0,10	4,89
4,5	71,20	94,93	0,09	5,50
5	74,20	89,04	0,09	6,12

Os dados presentes na Tabela 4.9 verificam que à medida que a velocidade de rotação do spindle aumenta, o valor da taxa de deformação angular aumenta e por consequência a viscosidade diminui.

Ao aplicar a função logaritmo aos valores de viscosidade e taxa de deformação angular obtêm-se os resultados (ver Tabela 4.10).

Tabela 4.10 Valores calculados através da aplicação do logaritmo da viscosidade e taxa de deformação angular

Log (viscosidade) (Pa.s)	Log (taxa de deformação angular) (s ⁻¹)
-0,43	-0,21
-0,66	0,09
-0,73	0,26
-0,81	0,39
-0,87	0,49
-0,92	0,57
-0,96	0,63
-0,99	0,69
-1,02	0,74
-1,05	0,79

Expondo os resultados em gráfico, traçou-se a reta de tendência juntamente com a equação dessa reta (ver Figura 4.6).

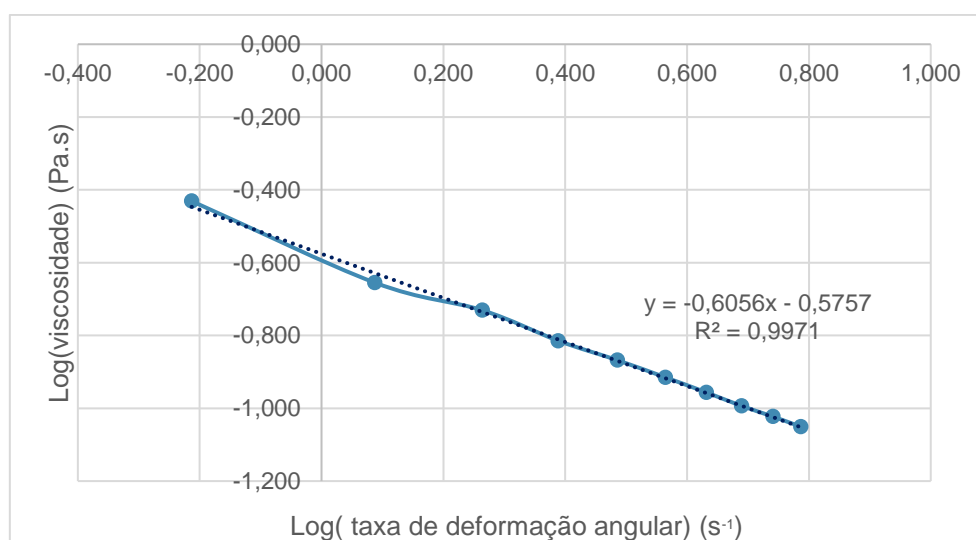


Figura 4.6 Representação gráfica do logaritmo da viscosidade (Pa.s) em função do logaritmo da taxa de deformação angular (s⁻¹)

A equação da reta presente na Figura 4.6, é uma equação do tipo $y = mx + b$, sendo m , o declive da reta e b , a ordenada na origem, correspondendo $(n - 1)$ e $\log(k)$, da Equação 4.2, ao declive e ordenada na origem, respetivamente. O valor de n é calculado através de $(n-1)$, ou seja $(n-1) = -0,61$, onde se obtém um valor para $n=0,39$. O valor de k corresponde à ordenada na origem do gráfico, $\log(k) = -0,58$, pelo que $k=0,27$ Pa.s.

Os valores determinados, das constantes da lei da potência: k , índice de consistência e n , índice de comportamento do fluido, permitem na secção seguinte (4.1.2.2 e 4.1.2.3), simular um fluido não newtoniano, tipo de fluido que é utilizado na mistura água + PolyGeo, no sistema Pulse Air.

4.1.2 Resultados das Simulações

4.1.2.1 Comparação modelos de turbulência

Foi realizada uma comparação dos modelos de turbulência de modo a entender qual o modelo que melhor se adaptava à problemática em estudo, escoamento gás-líquido.

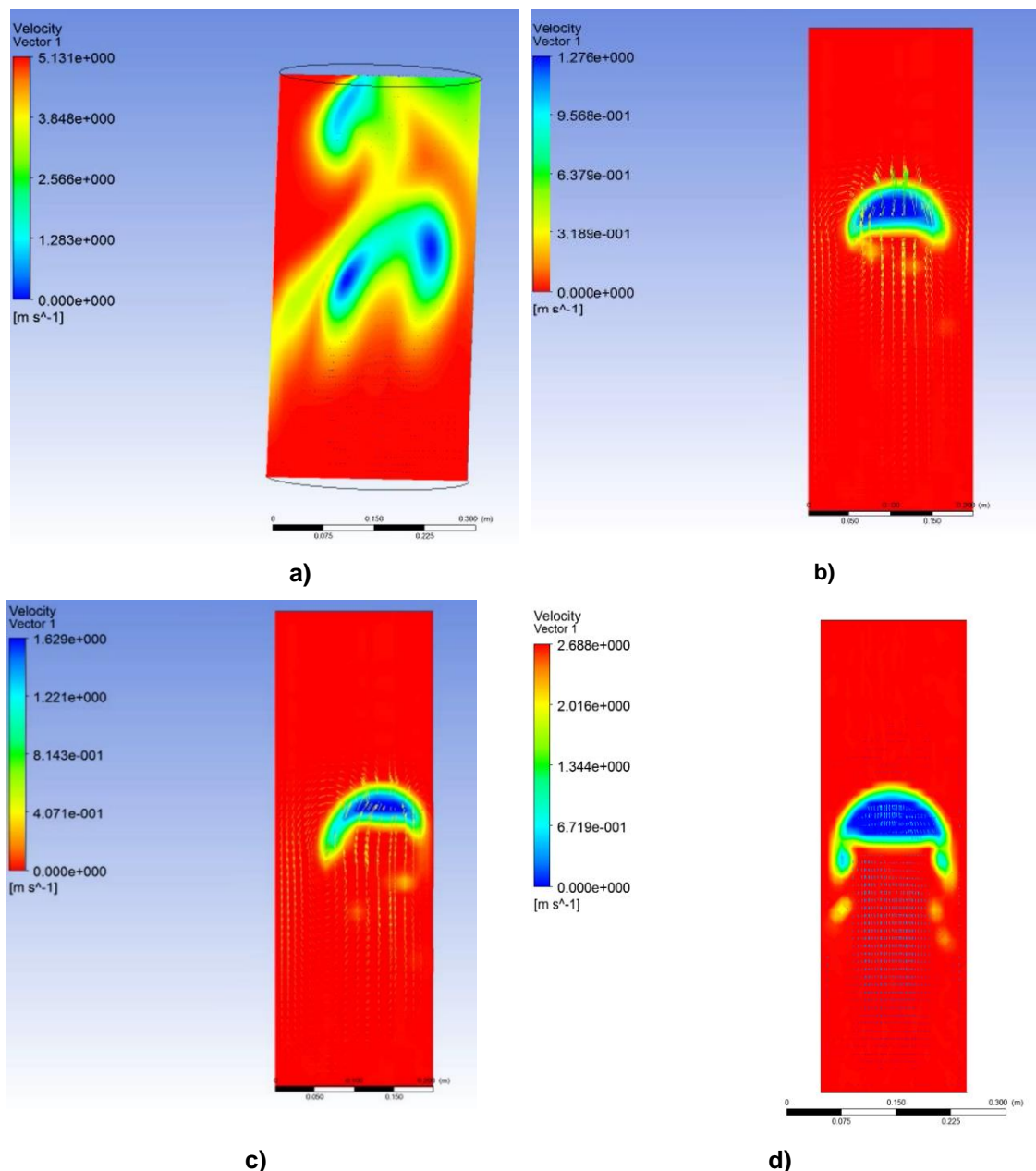


Figura 4.7 Comparação dos modelos; a) Modelo Mixture e k-epsilon Standard; b) Modelo VOF e k-epsilon Standard; c) modelo VOF e k-omega; d) modelo VOF e k-epsilon Realizable

Foi utilizado inicialmente o modelo multifásico Mixture e logo foi possível entender que em nada representa 2 fases separadas, mas duas fases misturadas, existindo interação de massa entre fases. Uma vez que o que se pretende são bolha/s a subir num fluido, sem mistura de fases, foi rejeitado a utilização do modelo (ver Figura 4.7 a). A utilização do modelo multifásico VOF (“volume of Fluid”), tem em conta 2 ou mais fluídos não miscíveis e quando a posição da interface dos fluidos é de interesse, sendo este o modelo que permite simular uma bolha num fluido (ver Figura 4.7 b) c) e d). De seguida avaliou-se qual o modelo de turbulência mais adequado à problemática em estudo e comparou-se através das velocidades de subida das bolhas, através da realização de simulações no Ansys Fluent, no Sistema Pulse Air e através da literatura.

As velocidades de subida da bolha, foram determinadas através da razão entre a distância percorrida (200 mm) e a diferença do tempo, desde o momento zero até aos 200 mm de distância.

Tabela 4.11 Resultados das velocidades de subida da bolha pela utilização de diferentes modelos no Ansys Fluent para um fluido newtoniano e comparação com velocidade de subida da bolha para o sistema Pulse Air utilizando água

Ensaio	Modelo multifásico	Modelo de Turbulência	Velocidade de subida da bolha (Ansys Fluent) (m/s)	Velocidade de subida da bolha Pulse Air (m/s)	Erro Relativo (%) entre as velocidades do Pulse Air e Ansys Fluent
20	Mixture	k-epsilon Standard	-	0,47	-
21	VOF	k-epsilon Standard	0,44		6,4%
22	VOF	k-omega Standard	0,42		10,6%
23	VOF	k-epsilon Realizable	0,40		14,9%

Assim, através da análise da Tabela 4.11 é possível relacionar as velocidades de subida da bolha obtidas na simulação com as velocidades de subida da bolha obtida com o sistema Pulse Air. Verifica-se que utilizando o modelo de turbulência k-omega Standard é apresentado um erro de 10,6% entre as velocidades do Pulse air e do Ansys Fluent e visualmente verifica-se um desvio da bolha junto à parede, pelo que o modelo em questão foi rejeitado. Em relação ao modelo de turbulência k-epsilon Standard, apresenta um erro relativo de 6,4% entre as velocidades do Pulse Air e do Ansys Fluent, superior ao erro apresentado pelo modelo k-epsilon Realizable, no entanto o modelo k-epsilon é o mais utilizado na indústria para simular escoamentos turbulentos, por ser mais robusto e simples e por minimizar os custos computacionais por iteração, ao contrário do modelo k-epsilon Realizable, que apesar de ser mais preciso e convergir mais facilmente, exige mais custos computacionais [171] [172]. Deste

modo o modelo selecionado para realizar as simulações futuras foi o modelo multifásico VOF, combinado com o modelo de turbulência k-epsilon Standard, pelas razões descritas acima.

4.1.2.2 Simulação CFD uma bolha de ar

De forma a ter uma representação computacional do sistema de agitação Pulse Air, foi simulado um escoamento multifásico gás-líquido, em que o líquido é a água ou o fluido não newtoniano e o ar, o gás. As bolhas de ar são dimensionadas tendo em conta o volume de ar que sai do sistema Pulse Air, que para um TOn de 0,1 segundos e uma pressão de 3,5 bar, utilizando um tubo pneumático de diâmetro interno de 4mm.

Na Figura 4.8 encontra-se representado o instante, ao fim de 0,2 segundos, em que a bolha começa a subir. As velocidades são apresentadas através de um código de cores, sendo que a cor vermelha, nesta representação, apresenta-se como a velocidade máxima.

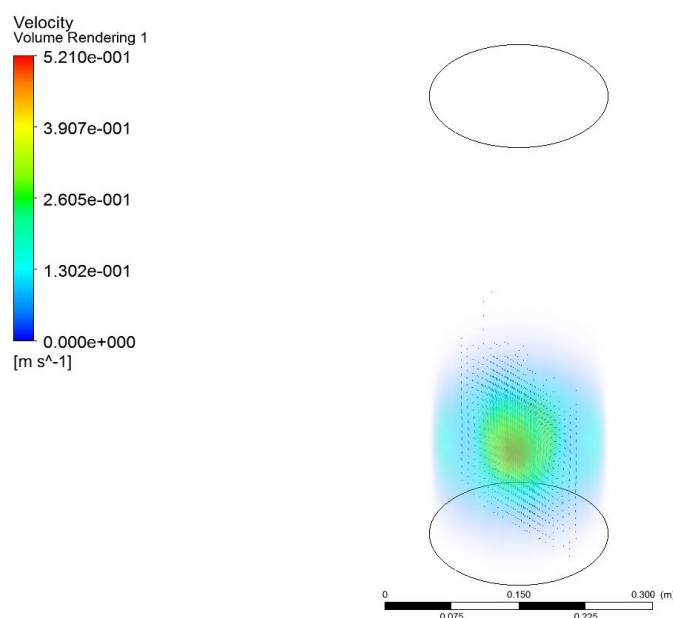


Figura 4.8 Representação de volume dos contornos de velocidade para a simulação de uma bolha de ar de 62 mm de raio num fluido newtoniano ao fim de 0,2 segundos

No CFD- Post, os resultados da simulação são mostrados em gráficos de contorno e de vetores. De modo a ser mostrado a bolha com mais detalhe, foi traçado um plano XY. No plano é mostrada uma bolha em instantes de tempo diferentes, desde o instante zero, até ao momento que atingem a superfície do fluido (Figura 4.9).

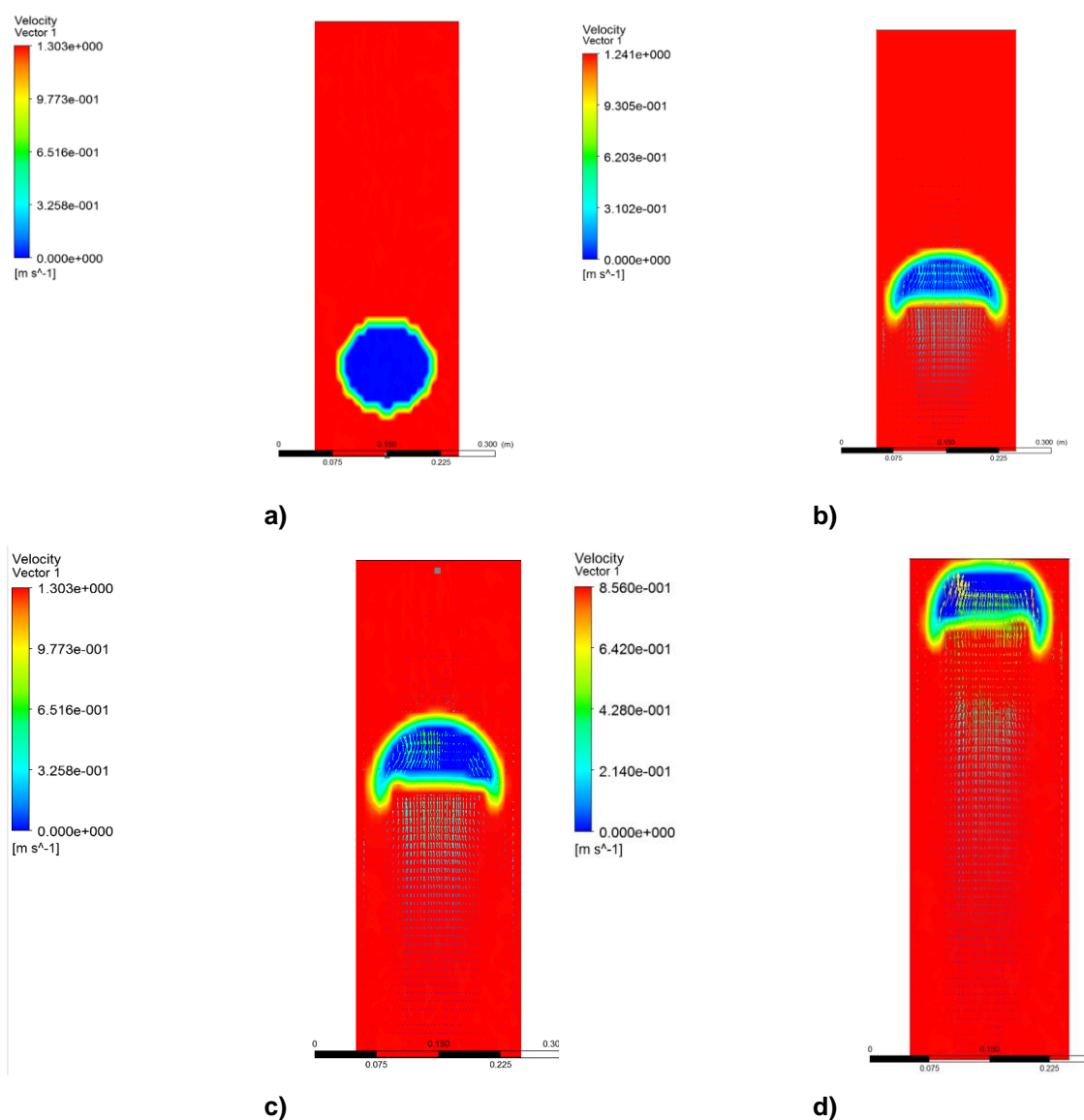


Figura 4.9 Representação gráfica de contornos e vetores de uma bolha de 62 mm de raio em diferentes instantes: a) instante zero segundos; b) instante 0,5 segundos; c) instante 1segundo; d) instante 1,5 segundos

A Figura 4.9, mostra a bolha a subir num fluido newtoniano, água. Foi também realizada a mesma simulação alterando o tipo de fluido, passando este a ser um fluido não newtoniano, representando a água + PolyGEO (utilizado no sistema Pulse Air).

Relativamente ao que se observa na simulação, é possível visualizar, através da figura acima, que o movimento da bolha a subir e a sua forma são bastante semelhantes, mais se acrescenta também que os movimentos dos vetores apresentados na simulação são observados no caso real (agitação através do sistema Pulse Air) provocando um movimento convectivo do fluido.

Tabela 4.12 Resultados das velocidades instantâneas nos instantes 0,5; 1 e 1,5 segundos para uma bolha num fluido newtoniano e não newtoniano

Tempo (s)	Velocidade instantânea (m/s)	
	newtoniano	não newtoniano
0,5	0,27	0,42
0,8	0,44	0,62
1	0,53	0,38
1,5	0,05	-

As velocidades obtidas na Tabela 4.12 são velocidades num determinado instante de tempo (0,5; 0,8; 1 e 1,5 segundos) e não velocidades médias, que têm em conta um intervalo de tempo. Assim sendo é possível ver pela Tabela 4.12 que as bolhas aceleram até chegarem à superfície e que num fluido não newtoniano a bolha chega à superfície ao fim de 1 segundo com uma velocidade instantânea de 0,38 m/s, enquanto que a bolha que se desloca num fluido newtoniano só atinge a superfície ao fim de 1,5 segundos, apresentando uma velocidade nesse ponto de 0,05 m/s. Assim é possível verificar uma tendência na velocidade, em que a bolha atinge velocidades um pouco superiores quando se desloca num fluido não newtoniano, através da Figura 4.10.

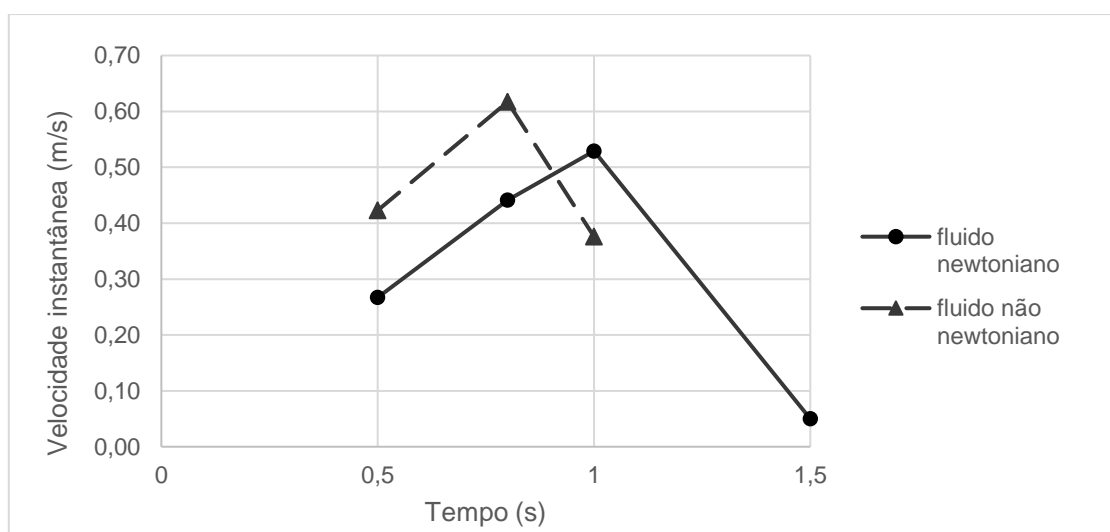


Figura 4.10 Representação gráfica das velocidades instantâneas para uma bolha num fluido newtoniano e não newtoniano

4.1.2.3 Simulação CFD de 4 bolhas de ar

Da mesma forma que a secção anterior (4.1.2.2), foram realizadas simulações utilizando 4 bolhas, que representam o volume de ar que sai dos 4 pratos de acumulação do Pulse Air, para uma pressão de sistema de 2 bar, TOn de 0,1 segundos e TOff de 2 segundos, estabelecendo um raio de bolha para estas condições de 34 mm.

Na Figura 4.11 encontra-se representado o instante, ao fim de 0,2 segundos, em que as 4 bolhas começam a subir. As velocidades são apresentadas através de um código de cores, sendo que a cor vermelha, nesta representação, apresenta-se como a velocidade máxima.

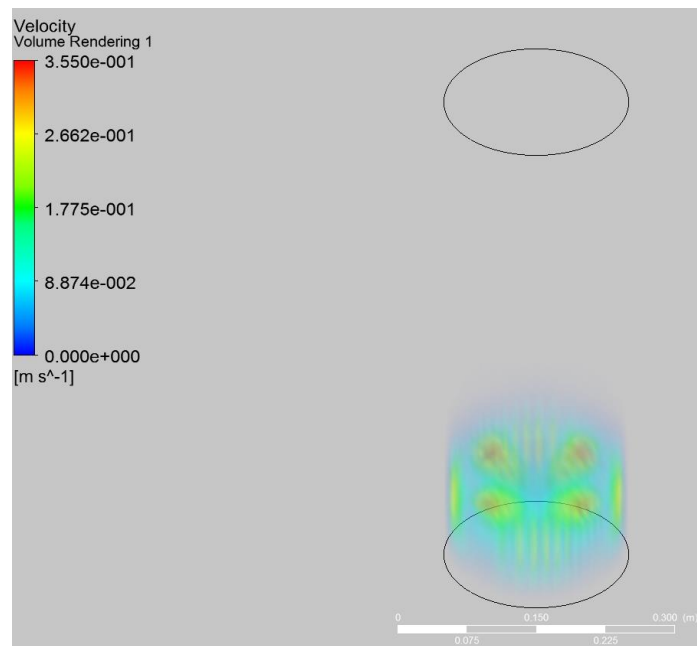
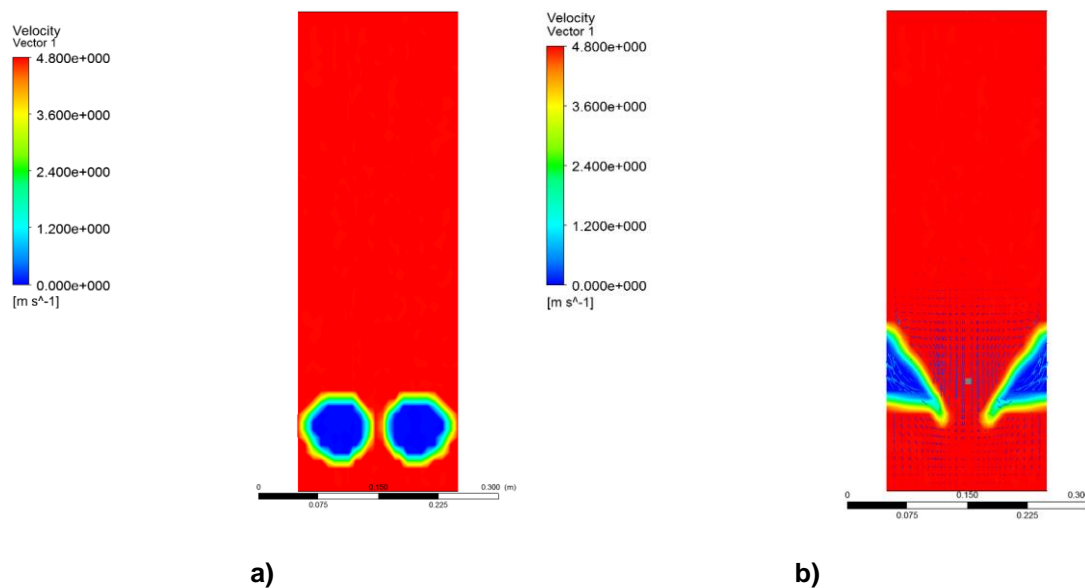


Figura 4.11 Representação de volume dos contornos de velocidade para a simulação de 4 bolhas de ar de 34 mm de raio num fluido newtoniano ao fim de 0,2 segundos

No CFD- Post, os resultados da simulação são mostrados em gráficos de contorno e de vetores. De modo a serem mostradas as bolhas com mais detalhe, foi traçado um plano XY. No plano são mostradas duas bolhas em instantes de tempo diferentes, desde o instante zero, até ao momento que atingem a superfície do fluido (ver Figura 4.12).



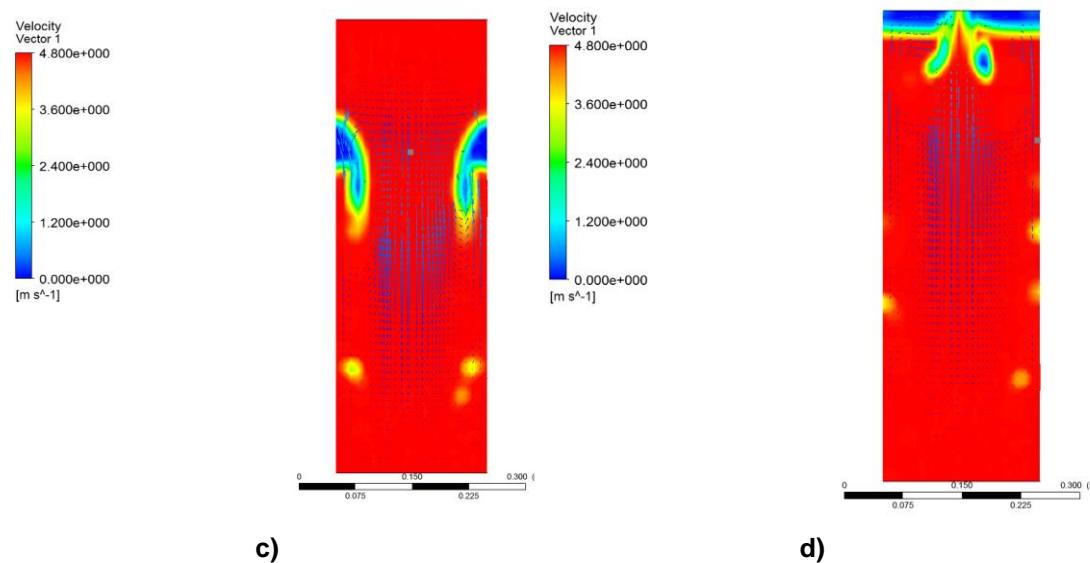


Figura 4.12 Representação gráfica de contornos e vetores de duas bolhas (Bolha 1 à esquerda e Bolha 2 à direita) de 34 mm de raio em diferentes instantes: a) instante zero segundos; b) instante 0,5 segundos; c) instante 1 segundo; d) instante 1,5 segundos

A Figura 4.12, mostra duas bolhas a subir num fluido newtoniano, água. Foi também realizada a mesma simulação alterando o tipo de fluido, passando este a ser um fluido não newtoniano, representando a água + polyGeo (utilizado no sistema Pulse Air).

Tabela 4.13 Resultados das velocidades instantâneas nos instantes 0,5; 1 e 1,5 segundos para bolhas num fluido newtoniano e não newtoniano

Velocidades instantâneas de subida da bolha (m/s)						
Tempo	newtoniano			não newtoniano		
	Bolha1	Entre as bolhas	Bolha 2	Bolha 1	Entre as bolhas	Bolha 2
0,5	0,32	0,10	0,45	0,37	0,19	0,60
0,8	0,36	0,15	0,50	0,56	0,25	0,67
1	0,47	0,22	0,56	0,68	0,31	0,70
1,5	0,80	0,26	0,63	-	-	-

Na Tabela 4.13, são mostradas as velocidades instantâneas obtidas para a bolha 1, sendo a bolha à esquerda, representada na Figura 4.12, a bolha 2, a bolha à direita e entre as bolhas é literalmente a velocidade entre as duas bolhas em questão. Verifica-se, uma tendência no aumento da velocidade das bolhas até atingirem a superfície do fluido. Verifica-se também que a bolha 1 não se desloca à mesma velocidade da bolha 2, sendo esta superior à da bolha 1, por exemplo ao fim de 0,8 segundos num fluido newtoniano a velocidade instantânea da bolha 1 é 0,36 m/s comparando com a velocidade instantânea na bolha 2 com 0,50 m/s.

Pela Figura 4.13 é possível verificar que a bolha se desloca mais rapidamente num fluido não newtoniano que num fluido newtoniano, pelo que as velocidades instantâneas de subida da bolha 1 ao fim de 1 segundo são num fluido newtoniano de 0,47 m/s e num fluido não newtoniano de 0,68 m/s.

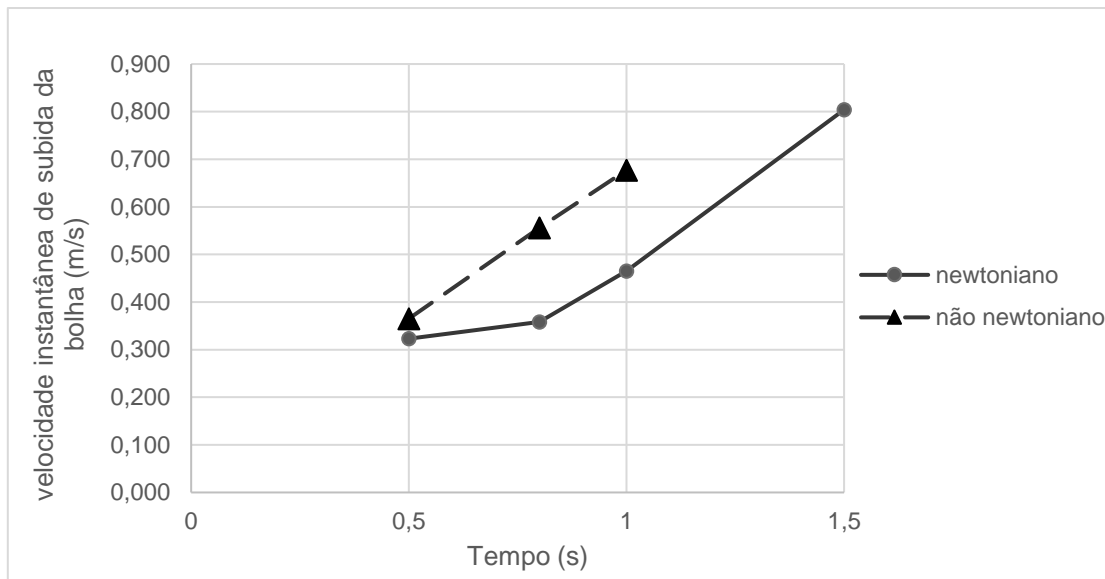


Figura 4.13 Representação gráfica das velocidades instantâneas da bolha 1 num fluido newtoniano e não newtoniano

4.1.2.4 Comparação das velocidades de subida das bolhas computacional e experimental

Foi realizada uma comparação das velocidades de subida das bolhas nos ensaios experimentais e computacionais de modo a conseguir retirar uma relação entre os dois procedimentos.

Assumindo que a bolha se comporta da mesma maneira, sendo apenas uma única bolha, foi possível comparar os resultados experimentais com os resultados computacionais para as velocidades de subida de uma bolha. Deste modo, através da Figura 4.14, mais uma vez é possível observar que uma bolha maior (neste caso com 1 litro de volume), movimenta-se mais rapidamente que uma bolha mais pequena (num tanque com a mesma geometria). Também é possível observar que nos ensaios experimentais (representado no gráfico por água e água + PolyGEO), a velocidade da bolha para um volume de 1 litro apresenta uma velocidade de 0,47 m/s, comparando com a velocidade obtida na simulação de 0,44 m/s, correspondendo a um erro relativo de 6,2% entre o caso real (Pulse Air) e a simulação (no Ansys Fluent), pelo que os resultados obtidos sugerem uma boa aproximação entre a simulação e os resultados experimentais.

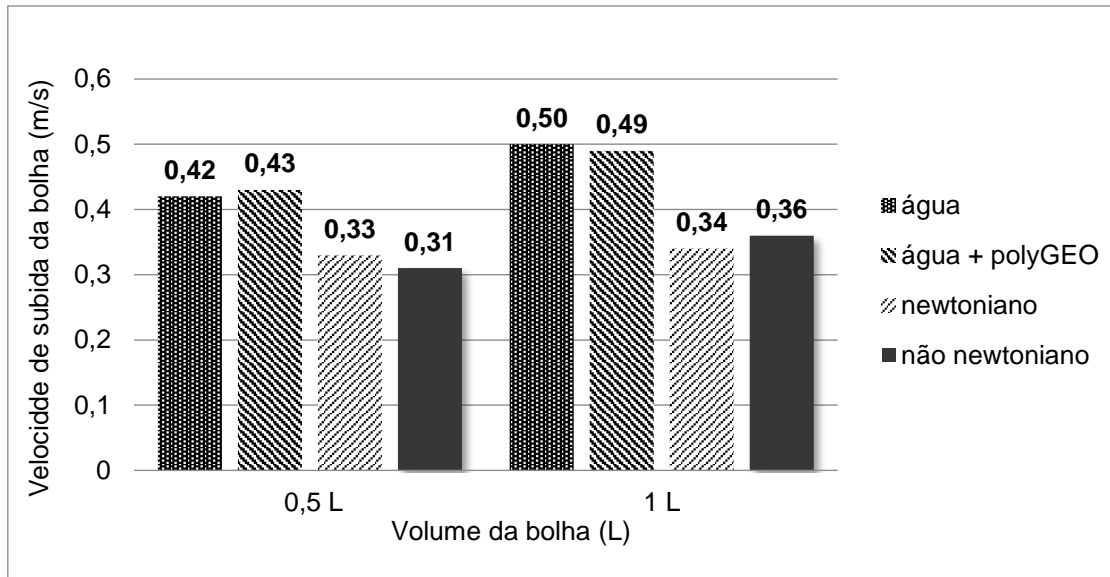


Figura 4.14 Representação gráfica da comparação de velocidade de subida da bolha em função do volume da bolha para água / fluido newtoniano e água+polyGEO/ fluido não newtoniano

4.2 Scale Up

4.2.1 Resultados Experimentais

4.2.1.1 Validação Experimental de um sistema Pulse Air utilizando um prato de acumulação de 1080 mm de diâmetro

A partir dos resultados obtidos no mini silo - escala laboratorial, verificou-se que os melhores valores dos parâmetros, TOn, TOff e Pressão do sistema Pulse Air foram, 0,1 segundos, 3 segundos e 3,5 bar, respetivamente.

A recolha das amostras para posterior medição da viscosidade e determinação da homogeneidade do fluido, ocorreu da seguinte forma, ver Figura 4.15.

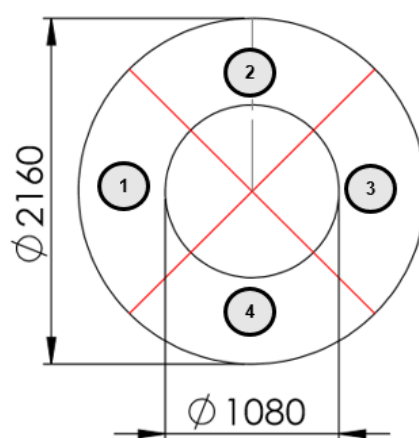


Figura 4.15 Zonas de tiragem de amostras no tanque: (1) amostra da superfície; (2) amostra do fundo do tanque; (3) amostra da superfície; (4) amostra do fundo do tanque

Foram realizados os ensaios de acordo com o que foi descrito na secção 3.2.2.1.1. Os resultados obtidos foram:

Tabela 4.14 Resultados obtidos scale up para as condições do mini silo

Ensaio	TOn (s)	TOff (s)	Pressão (bar)	Média viscosidade (s/quarto)	Desvio Padrão (ml/s)	Viscosidade ≥ 90 s/quarto e Desvio padrão $\leq 0,3$ ml/s
28	0,1	3	3,5	77	0,54	x
29	0,3	3	3,5	80	0,93	x
30	0,1	2	3,5	82	0,61	x

Através da Tabela 4.14 é possível verificar para as condições operacionais do Pulse Air, TOn, TOff e pressão, cujos valores são 0,1 segundos, 3 segundos e 3,5 bar (Ensaio 28), respetivamente, não permitiram cumprir o objetivo, uma vez que foi obtida uma viscosidade de

77 s/quarto e um desvio padrão aos caudais de escoamento de 0,54 ml/s, lembrando que o objetivo é 90 s/quarto e 0,30 ml/s de desvio padrão aos caudais de escoamento. Os restantes ensaios realizados (Ensaio 29 e 30) também não permitiram cumprir o objetivo, no entanto o ensaio 28 apresenta-se com menor valor de desvio padrão relativo à homogeneidade do fluido.

Em todos os ensaios foi verificada a tendência de maiores valores de viscosidade à superfície comparativamente ao fundo do tanque, aproximadamente 10 s/quarto de diferença, ver Tabela 4.15. Tal fato deveu-se a uma má agitação do fundo do tanque em que o polímero aderiu ao fundo do tanque, sendo difícil a sua remoção. Verifica-se a existência de maior concentração de polímero no fundo do tanque na zona 3 de tiragem (Figura 4.15). A zona 3, apresentou-se como uma zona com pouca agitação.

Tabela 4.15 Viscosidades das amostras recolhidas no fundo e superfície no tanque de Scale up

Ensaio	Viscosidade (s/quarto)				Média viscosidade (s/quarto)
	Superfície		Fundo		
	A ₁	A ₃	A ₂	A ₄	
28	79	83	74	74	77
29	87	85	76	72	80
30	86	86	78	77	82

A Figura 4.16 a) mostra visualmente essa concentração de polímero, correspondendo às zonas mais esbranquiçadas e a posterior remoção do polímero, ver Figura 4.16 b).



Figura 4.16 a) Concentração de polímero no fundo do tanque; b) remoção do polímero colado ao fundo do tanque

Não foi possível a realização de ensaios com uma pressão superior a 3,5 bar, devido à pouca capacidade do compressor. Para além da limitação do compressor, o prato apresentou-se mal dimensionado, não permitindo saída de ar num dos lados do prato acumulador o que impediu uma agitação uniforme do tanque.

4.2.2 Resultados das Simulações

Foi realizada uma simulação tendo em conta o volume de bolha que sai do sistema Pulse Air para as condições operacionais de TOn, TOff e pressão de 0,3 segundos, 3 segundos, 3,5 bar, respetivamente. Simulou-se a bolha num tanque com água e observou-se o movimento dos vetores à medida que a bolha subia e registaram-se as velocidades instantâneas de subida da bolha (Figura 4.17).

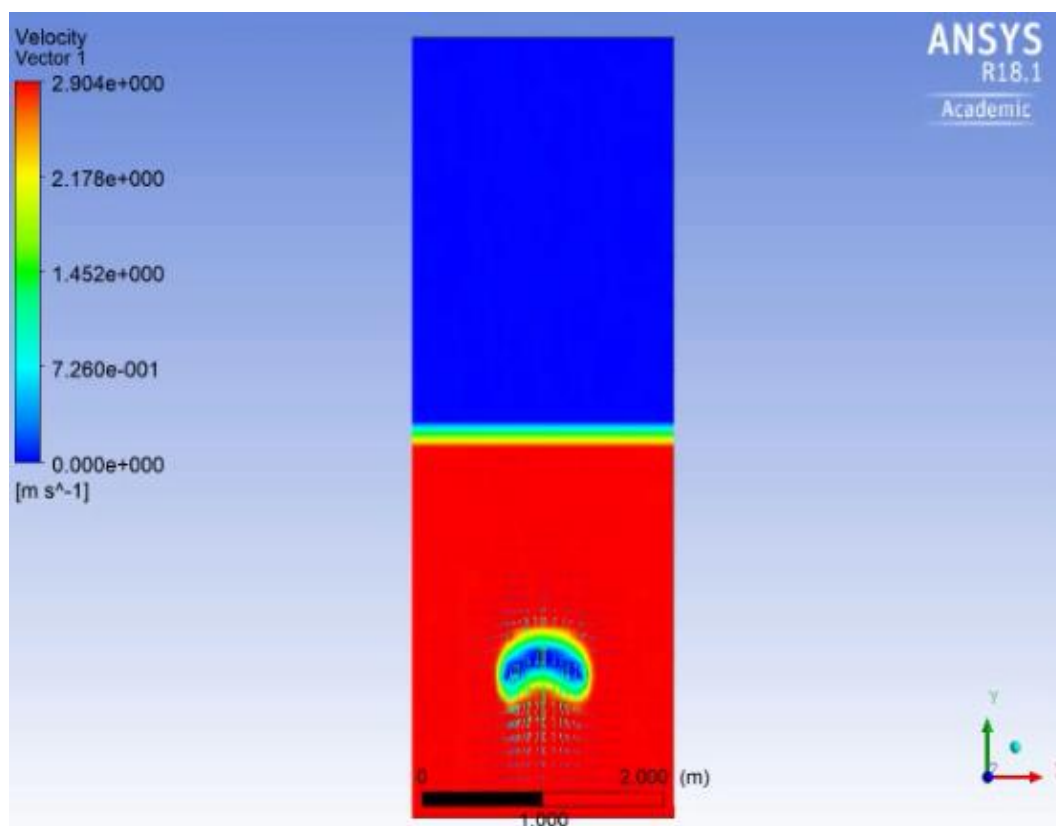


Figura 4.17 Representação gráfica de contorno e vetores da velocidade

Verifica-se pela Figura 4.17 que a bolha ao subir origina um movimento convectivo do fluido.

Através da Tabela 4.16, é possível observar que a velocidade da bolha vai desacelerando à medida que chega à superfície. Verifica-se também que junto às paredes do tanque os vetores de velocidade são menos intensos pelo que a velocidade instantânea da bolha junto à parede é menor, obtendo velocidades de cerca de 0,04 m/s. Como junto à parede o movimento é menor, comparando com o sistema Pulse Air vai haver menos agitação nessa zona, logo maior probabilidade de haver concentração de polímero junto às paredes do tanque.

Tabela 4.16 Resultados das velocidades instantâneas de subida da bolha e junto à parede do tanque para uma bolha de 307mm de raio

Ensaio	Tempo (s)	Velocidade instantânea de subida da bolha
		(m/s)
31	0,5	1,46
	1	1,37
	1,5	1,36
	2	1,22
	2,5	1,20
	3	1,05
	3,5	0,92
	4	0,79
	4,5	0,61
	5	0,48

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

No presente trabalho foi possível estudar um sistema de mistura a ar comprimido – Sistema Pulse Air- capaz de gerar um fluido polimérico completamente dissolvido e com viscosidade igual ou superior a 90 s/quarto, com pH entre 11 e 12, quando dissolvido num rácio de 1 grama de polímero por 1 litro de água.

A nível de escala laboratorial-Mini silo- foi possível estudar a nível experimental as variáveis: número de pratos (1 e 4 pratos) e o tempo de paragem do pulso de ar (Toff). Foi possível concluir que a melhor combinação de parâmetros operacionais do Pulse Air foi 1 prato de 100 mm de diâmetro, condições operacionais com um Ton de 0,1 segundos, Toff de 3 segundos e uma pressão do sistema de 3,5 bar, sendo obtido para estas condições uma viscosidade de 92 s/quarto e um desvio padrão dos caudais de 0,19 ml/s (ensaio 10).

Conclui-se também que a viscosidade aumenta com a diminuição da temperatura, no entanto verifica-se que a homogeneidade do fluido é afetada, uma vez que a diminuição da temperatura, dificulta a dissolução dos polímeros, diminuindo a solubilidade do polímero.

A nível de computacional foi possível simular bolhas e obter velocidades de subida das bolhas e comparar com o caso real no Pulse Air. Verifica-se um erro relativo de aproximadamente 6,4% na comparação das velocidades obtidas experimentalmente e quando registadas no Pulse Air. Embora o valor do erro relativo seja inferior a 10%, as simulações apresentadas permitem comparações aproximadas apenas relativamente à velocidade de subida de bolhas e o movimento do fluido dentro do tanque.

Relativamente ao scale up conclui-se que as condições experimentais utilizadas não permitiram o cumprimento do objetivo, no entanto o prato de acumulação utilizado não permitia uma saída uniforme do ar por toda a área do prato provocando zonas com maior concentração de polímero no fundo do tanque.

No futuro seria de interesse a otimização da simulação, conseguir refletir o caso real, utilizando os pratos e a entrada de ar nos pratos de acumulação e relativamente ao scale up, seria importante o aumento de pressão de forma a provocar grande agitação no fundo do tanque, diminuindo a acumulação de polímero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Hermann Staudinger and the Foundation of Polymer Science." [Online]. Available: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/staudingerpolymerscience.html/hermann-staudinger-macromolecules>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [2] R. Mülhaupt, "Hermann staudinger and the origin of macromolecular chemistry," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 43, no. 9, pp. 1054–1063, 2004.
- [3] N. Lecture, "Macromolecular Chemistry," *Phys. Today*, vol. 14, no. 5, pp. 86–88, 1961.
- [4] F. N. Kelley, "How are polymers made?," *Scientific American*. [Online]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/how-are-polymers-made/>. [Accessed: 21-Mar-2017].
- [5] "Natural vs Synthetic Polymers." [Online]. Available: <http://www.cmu.edu/gelfand/k12-teachers/polymers/natural-synthetic-polymers/>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [6] "Synthetic Polymers," in *University Science Books*, 2011.
- [7] P. Zarifeh, "Neoprene: The inside story." [Online]. Available: http://www.seventhwave.co.nz/site/seventhwave/files/Neoprene_Inside_Story.pdf. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [8] W. Carothers, "Synthetic Fiber," 1938.
- [9] *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, vol 3, pp. 618-643, 2000.
- [10] L. Tossarelli, "the History of nylon," Dipartimento di Chimica IFM dell'Università di Torino, Via P. Giuria 7 Torino, Italy 2000.
- [11] "Polystyrene and Styrofoam." [Online]. Available: <http://theinventors.org/library/inventors/blpolystyrene.htm>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [12] "Plastics Europe." [Online]. Available: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/polystyrene.aspx>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [13] "Rayon." [Online]. Available: <http://www.fcencias.com/2015/10/08/rayon-laboratorio-online/>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [14] "A History of Synthetics: Acrylic." [Online]. Available: <http://blog.tuppencehapenny.co.uk/2011/02/history-of-synthetics-acrylic.html>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [15] "Poliacrilonitrila ou orlon." [Online]. Available: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/poliacrilonitrila-ou-orlon.htm>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [16] ChemViews, "100th Anniversary of the First PVC Patent." [Online]. Available: http://www.chemistryviews.org/details/ezone/4899111/100th_Anniversary_of_the_First_PVC_Patent.html. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [17] "The history of PVC." [Online]. Available: <http://www.pvc.org/en/p/history>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [18] E. Yousif and A. Hasan, "Photostabilization of poly(vinyl chloride) – Still on the run," *J. Taibah Univ. Sci.*, vol. 9, no. 4, pp. 421–448, 2015.
- [19] M. L. Hallensleben and H. Chemie, "Poly(vinyl chloride)," in *Ullmann's Encyclopedia of*

Industrial Chemistry, 2012, p. 621.

- [20] "PVC." [Online]. Available: http://www.institutodopvc.org/publico/?a=conteudo&canal_id=39&subcanal_id=43. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [21] V. Green and D. Stott, "Polyacrylamide: A review of the use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment," *10th Int. Soil ...*, pp. 384–389, 1999.
- [22] "Polyacrylamide." [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/polyacrylamide>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [23] "What is Polyacrylamide Gel Electrophoresis (PAGE)?" [Online]. Available: [http://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Polyacrylamide-Gel-Electrophoresis-\(PAGE\).aspx](http://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Polyacrylamide-Gel-Electrophoresis-(PAGE).aspx). [Accessed: 06-Mar-2017].
- [24] Edwin R. Kolodny, "Polyacrylamide Preparation," 1961.
- [25] H. Jamshidi, A. Rabiee, H. Jamshidi, and A. Rabiee, "Synthesis and Characterization of Acrylamide-Based Anionic Copolymer and Investigation of Solution Properties," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014.
- [26] S. S. Wong, T. T. Teng, A. L. Ahmad, A. Zuhairi, and G. Najafpour, "Treatment of pulp and paper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 135, no. 1–3, pp. 378–388, 2006.
- [27] "Polyacrylamide and Wastewater Treatment." [Online]. Available: <http://www.zlpam.com/wp-content/uploads/2011/11/About-Polyacrylamide-Fact-Sheet.pdf>. [Accessed: 06-Mar-2017].
- [28] X. Zhao, L. Liu, Y. Wang, H. Dai, D. Wang, and H. Cai, "Influences of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) residue on the flocculation behavior of oily wastewater produced from polymer flooding," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 199–204, 2008.
- [29] R. K. Clark, R. . Scheuerman, H. Rath, and H. G. Van Laar, "Polyacrylamide/Potassium-Chloride Drilling Water-Sensitive Shales," *J. Pet. Technol. SPE 5514*, vol. June, pp. 719–727, 1976.
- [30] R. Caenn and G. V Chillingar, "Drilling fluids: State of the art," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 221–230, 1996.
- [31] ASME Shale Shaker Committee, *Drilling fluids processing handbook*. Gulf Professional Publishing, 1st ed, 2004.
- [32] C. T. Arthur C. Skooglund, "Wax-polymer blend manufacture," 1942.
- [33] R. M. Thomas, "Polymerization process for normal olefins," 1945.
- [34] J. H. Gerry P. Mack, "Aqueous polyisobutylene emulsions," 1945.
- [35] C. E. Schildknecht, "Polyvinyl pyrrolidone and process of producing the same," 1953.
- [36] W. C. Bedoit, "Preparation of high molecular weight polyethylene glycols," 1960.
- [37] A. B. S. and J. L. Erust, "Preparation of high molecular weight polyisobutylene," 1960.
- [38] M.-F. Cheung, "Method of making aqueous coating compositions of acrylic polymer latex, acrylic polymer solution, aminoplast and acrylic stabilizer polymer," 1975.
- [39] Dae Suk Song, "Low molecular weight hydrolyzed polyacrylamide used as a scale inhibitor in water systems," 1978.

- [40] R. A. Smith, "High molecular weight polyacrylamide synthesis," 1986.
- [41] A. Farooq, "Aqueous composition containing a non-crosslinked polymer for augmenting viscosity," 1993.
- [42] H.-J. Hähnle, "Preparation of high molecular weight polymers," 1997.
- [43] "High Molecular Weight Polymers in the New Chemicals Program." [Online]. Available: <https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/high-molecular-weight-polymers-new>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [44] L. H. Sperling, "Molecular weights of polymers," in *Introduction to physical polymer science*, 4th ed., J. W. & Sons, Ed. 2015, p. 880.
- [45] "Water Soluble Polymers," *SNF Floerger*, pp. 1–8.
- [46] "Synthetic Water-Soluble Polymers." [Online]. Available: <https://www.ihs.com/products/synthetic-water-soluble-chemical-economics-handbook.html>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [47] G. Swift, "Water-soluble polymers," *Elsevier*, vol. 45, pp. 452–521, 1994.
- [48] Z. Amjad, *Water Soluble Polymers: Solution Properties and Applications*. 2002.
- [49] U. Bolmstedt, "About rheology." [Online]. Available: http://www.iq.usp.br/mralcant/About_Rheo.html. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [50] G. Elert, "The physics hypertextbook." [Online]. Available: <http://physics.info/viscosity/>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [51] "Defining viscosity." [Online]. Available: <http://www.viscopedia.com/basics/defining-viscosity/>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [52] "Viscosity of Newtonian and non-Newtonian Fluids." [Online]. Available: <http://www.rheosense.com/applications/viscosity/newtonian-non-newtonian>. [Accessed: 08-Mar-2017].
- [53] D. Nelik, "Newtonian and Non-Newtonian Fluids." [Online]. Available: <http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/centrifugal-pumps/newtonian-and-non-newtonian-fluids-0>. [Accessed: 21-Mar-2017].
- [54] S. M. Richardson, "Non-newtonian fluids," 2011. [Online]. Available: <http://www.thermopedia.com/content/986/>.
- [55] E. Mitsoulis, "Flows of viscoplastic materials: Models and computations," *Rheol. Rev.*, vol. 2007, pp. 135–178, 2007.
- [56] R. P. Chhabra, "Non-Newtonian fluids: An introduction," in *Rheology of Complex Fluids*, 2010, pp. 3–34.
- [57] "Types of Flow and Rheology Models of Drilling Mud," 2016. [Online]. Available: <http://www.drillingformulas.com/types-of-flow-and-rheology-models-of-drilling-mud/>. [Accessed: 17-Mar-2017].
- [58] "Viscosity for Non-Newtonian Fluids," 2003. [Online]. Available: <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node297.htm>. [Accessed: 21-Mar-2017].
- [59] M. M. Cross, "Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems," *J. Colloid Sci.*, vol. 20, no. 5, pp. 417–437, 1965.
- [60] V. N. Kalashnikov, "Shear-rate dependent viscosity of dilute polymer solutions," *J. Rheol.*

- (N. Y. N. Y.), vol. 38, no. October, p. 1385, 1994.
- [61] M. KURATA, K. OSAKI, O. EINAGA, and T. SUGIE, "Effect of Molecular Weight Distribution on Viscosity of Polymeric Fluids," *J. Polym. Sci., Part B Polym. Phys.*, vol. 12, pp. 849–869, 1967.
 - [62] R. S. Porter and J. F. Johnson, "The Effect of Molecular Weight and Distribution on Polymer Rheology near the Entanglement Region," *Trans. Soc. Rheol.*, vol. 7, no. 1, pp. 241–252, 1963.
 - [63] G. C. Berry and T. G. Fox, "The viscosity of polymers and their concentrated solutions," *Adv. Polym. Sci.*, vol. 5/3, pp. 261–357, 1968.
 - [64] E. Hinrichsen, "Viscosity Measurement Equipment," 2010. [Online]. Available: <http://www.brighthubengineering.com/fluid-mechanics-hydraulics/83996-viscosity-measurement-equipment/>. [Accessed: 17-Mar-2017].
 - [65] "Viscosímetro capilar." [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/pt/prod/lauda-dr-r-wobser-gmbh-co-kg/product-23650-501312.html>. [Accessed: 27-Mar-2017].
 - [66] P. Coelho, "Viscosidade: Dinâmica e cinemática." [Online]. Available: <http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/04/viscosidade-dinamica-e-cinematica.html>. [Accessed: 27-Mar-2017].
 - [67] "Marsh flow cone." [Online]. Available: <http://www.reliancelab.co.za/marsh-flow-cone/>. [Accessed: 27-Mar-2017].
 - [68] "Marsh Funnel Viscometer." [Online]. Available: <http://www.fann.com/fann/products/oil-well-cement-testing/viscosity/marsh-funnel.page>. [Accessed: 21-Mar-2017].
 - [69] "Fundamentals of onshore drilling." [Online]. Available: <http://geologie.vsb.cz/DRILLING/drilling/theory.html>. [Accessed: 27-Mar-2017].
 - [70] F. W. Billmeyer and J. Wiley, *Textbook of Polymer*, Third Edit. 1984.
 - [71] G. S. Misra, *Introductory Polymer Chemistry*. 1993.
 - [72] McGreavy, *Polymer Reactor Engineering*, First. Chapman & Hall, 1994.
 - [73] B. Kronberg, K. Holmberg, and B. Lindman, *Surface Chemistry of Surfactants and Polymers*. 2014.
 - [74] M. Rao, "Taking the mystery out of polymer activation," 1995.
 - [75] "Dispersão de pigmentos da DuPont em líquidos," 2002.
 - [76] "How a polymer gets dissolved." [Online]. Available: 15/03/2017.
 - [77] E. T. Sortwell, "Method of dispersing dry, water-soluble polymers in water," 1986.
 - [78] Lubrizol, "How to Prepare Aqueous Dispersions of Carbopol Polymers," *Tech. data sheet*, 2007.
 - [79] Aquafy, "Aquafy Dry Polymer Makedown Systems."
 - [80] K. Langhorn and C. Banaszek, "Disperse difficult solids," *Chem. Eng.*, vol. 116, no. 7, pp. 40–43, 2009.
 - [81] Ross Mixing, "Eliminate 'fish eyes' in your mix," *Mix. Technol. Insight #5*, pp. 2–3.
 - [82] "Statiflo." [Online]. Available: <http://www.statiflo.com/en/about-static-mixing/mixing-classifications>. [Accessed: 08-Mar-2017].

- [83] "The different types of mixing equipment." [Online]. Available: <http://www.ginhong.com/articles/the-different-types-of-mixing-equipment/>. [Accessed: 08-Mar-2017].
- [84] "BLENDCON™ Air Blender." [Online]. Available: <http://www.dynamicair.com/products/airblender379.html>. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [85] D. S. Dickey, "Tackling difficult mixing problems," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 111, no. 8, pp. 35–42, 2015.
- [86] S. M. Kresta, A. W. Etchells, D. S. Dickey, and V. A. Atiemo-Obeng, *Advances in Industrial Mixing: A Companion to the Handbook of Industrial Mixing*. 2015.
- [87] "Dimensionless Numbers," *Fogler & Gurmen University of Michigan*, 2008. [Online]. Available: <http://www.umich.edu/~elements/01chap/html/reactors/mixing/dn.htm>. [Accessed: 04-Apr-2017].
- [88] W.-M. Lu, H.-Z. Wu, and M.-Y. Ju, "Effects of baffle design on the liquid mixing in an aerated stirred tank with standard Rushton turbine impellers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 21–22, pp. 3843–3851, 1997.
- [89] "Impeller types." [Online]. Available: <http://www.umich.edu/~elements/01chap/html/reactors/mixing/impeller.htm>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [90] mixer Direct, "Radial and Axial Flow Impellers," 2017. [Online]. Available: <http://blog.mixerdirect.com/what-is-the-difference-between-axial-and-radial-flow-impellers>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [91] "Agitator impeller / 3-blade / axial-flow." [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/prod/national-oilwell-varco-nov/product-14821-773461.html>. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [92] "JT-2." [Online]. Available: <http://www.chemineer.com/products/chemineer/impellers/item/368-jt-2.html>. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [93] "Agitator impeller / for transitional flow." [Online]. Available: http://www.directindustry.com/prod/national-oilwell-varco-nov/product-14821-773461.html#product-item_1713202. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [94] "Agitator impeller / helical ribbon / axial-flow." [Online]. Available: http://www.directindustry.com/prod/national-oilwell-varco-nov/product-14821-453350.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [95] I. S. Brumagim, "Radial Propeller Agitator," 1941.
- [96] E. C. Cayuga, "Apparatus for disseminating materials in liquids," 1947.
- [97] E. C. Cayuga, "Apparatus for disseminating solids in liquids," 1940.
- [98] L. F. Samler, "Blending method and apparatus," 1955.
- [99] Da. G. Bosse, "Mixing Apparatus," 1960.
- [100] F. E. Browning, "Mixing Impellers," 1962.
- [101] W. M. Zingg, Tulsa, and Okla, "Eductor Mixing Apparatus," 1967.
- [102] "Airmaster Venturi Principle." [Online]. Available:

- http://www.hendersons.co.uk/wms/venturi_principle.html. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [103] "Efeito Venturi e suas Aplicações em Sistemas de Tratamento de Efluentes Aeróbios," 2014. [Online]. Available: <http://helibombas.com.br/blog/efeito-venturi-e-suas-aplicacoes-em-sistemas-de-tratamento-de-efluentes-aerobios/>. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [104] "LEAP." [Online]. Available: <http://www.leapengineeredproducts.com/en/conveying-eductors.php>. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [105] G. A. Latinem, "Mixer," 1973.
- [106] T. Socha, "Fluid mixing device," 1992.
- [107] R. Yatomi and M. Kuratsu, "Vertical Agitating Apparatus," 2001.
- [108] W. Parker, "Fluid mixing apparatus," 2006.
- [109] H. Matsumoto, M. Kuramoto, and M. Hiraki, "Agitator, a circulatory cleaning device attached to the agitator, and a circulatory line system comprising the circulatory cleaning device," 2009.
- [110] W. G. Lott, "Method for mixing fluids with an eductor," 2010.
- [111] "Mixing Systems." [Online]. Available: <http://www.mixing.com/index.php/jet-mixing>. [Accessed: 22-Mar-2017].
- [112] "JETMIX™ VORTEX MIXING SYSTEM." [Online]. Available: <http://www.evoqua.com/en/brands/Envirex/Pages/jetmix.aspx>. [Accessed: 22-Mar-2017].
- [113] L. B. van Munster, "Method of mixing materials and a pneumatic mixing device adapted to said method," 1964.
- [114] G. Grün, "Apparatus for threatment of powdered and granular material," 1965.
- [115] A. L. Krefeld-Bockum, "Method of and apparatus for the mixing, drying, or moistening by pneumatic means of material in powder form," 1968.
- [116] J. R. Steele, "Continuous Flow air blender for dry granular materials," 1990.
- [117] J. R. Steele, "Blender," 2004.
- [118] J. R. Steele, "Blender," 2007.
- [119] A. Blender, "Blendcon® Air Blender - Fast, Low Shear Blending in 30 Seconds!," 2016.
- [120] R. S. Markfelt, "Mixing Apparatus," 1974.
- [121] D. Pedro P. Cabrera; Robert T, "Method and apparatus for regulating the size and frequency of bubbles employed for mixing liquids," 1979.
- [122] R. W. Fletcher, "Liquid mixing and transfer apparatus and method," 1971.
- [123] K. R. I. R. W. F, "Automatic method and apparatus for obtaining different dilutions from blood or the like samples and processing the same by fluid handling and electronics to obtain certain nonelectric parameters," 1970.
- [124] C. Schofield, "Mixing Devices," 1982.
- [125] "Method and apparatus for gas induced mixing and blending," 1989.
- [126] "Pulsair." [Online]. Available: <http://pulsair.com/how-it-works>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [127] "EnviroMix." [Online]. Available: <http://www.enviro-mix.com/technology/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [128] "Homogenising fluids with compressed gas," pp. 1–4, 2014.

- [129] "Mixing." [Online]. Available: <http://www.winenv.com/mixing.html>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [130] "Pulsed-Air Mixer", Summary Report, U.S. Department of Energy, 1999.
- [131] G. Sudrot, "Mixer for fluid or solid substances," 2003.
- [132] "How pulsair bubble power works to mix tank contents." .
- [133] R. E. Parks, "Method and apparatus for gas induced mixing and blending of fluids and other materials," 2003.
- [134] R. J. Koopmans, "Mixer for use in Wastewater treatment processes," 2008.
- [135] "Mission Fertilizer." [Online]. Available: <http://missionfertilizer.com/>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [136] "McGregor." [Online]. Available: <http://www.mcgregor.com/home/about/seed-care/>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [137] "Pulsair Systems Announces Partnership with USA Diving," 2013. [Online]. Available: <http://www.sportsdestinations.com/management/marketing-sponsorships/pulsair-systems-announces-partnership-usa-diving-6268>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [138] "Pulsair Systems Announces Partnership with USA Diving to become Official Supplier of Diving Bubbler Systems," *Free Press Release*, 2013. [Online]. Available: <http://www.free-press-release.com/news-pulsair-systems-announces-partnership-with-usa-diving-to-become-official-supplier-of-diving-bubbler-systems-1370277727.html>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [139] "LIQUID MIXING SOLUTIONS FROM BY AIR LIQUID MIXING SOLUTIONS," 2008. [Online]. Available: <http://www.ferret.com.au/c/by-air-liquid-mixing-solutions/liquid-mixing-solutions-from-by-air-liquid-mixing-solutions-n737720>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [140] Z. T. Hicks, "Partial Budgeting Analysis of Conventional Pump over versus Pulsair Cap Managment System for a Large-Scale California Winery," 2011.
- [141] L. Daniel, "Mixing Tanks With Air," 2012. [Online]. Available: <https://www.winesandvines.com/template.cfm?section=features&content=97804>. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [142] M. R. Powell and C.R.Hymas, "Retrieval Process Development and Enhancements FY96 Pulsed-Air Mixer Testing and Deployment Study," 1996.
- [143] R. E. Parks, "Method and Apparatus for gas induced mixing and blending," 1986.
- [144] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principal and Applications*, 3th ed. 2005.
- [145] B. Xia and D.-W. Sun, "Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry: a review," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 34, no. 1–3, pp. 5–24, 2002.
- [146] J.Bode, "Computational fluid dynamic applications in the chemical industry," p. 1994.
- [147] T. Nortona and D.-W. Sun, "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review," 2007.
- [148] K. Fujii, "Progress and future prospects of CFD in aerospace—Wind tunnel and beyond," 2005.
- [149] P. G. Tucker and Y. Liu, "Contrasting CFD for electronic systems modeling with that for

- aerospace,” pp. 618–625, 2005.
- [150] T. Koybayashi and K. Kitoh, “A Review of CFD Methods and Their Application to Automobile Aerodynamics,” 1992. [Online]. Available: <http://papers.sae.org/920338/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
 - [151] “Computational Fluid Dynamics (CFD) for oil and gas applications.” [Online]. Available: <http://www.bmtfm.com/sectors/oil-and-gas/flow-assurance/>. [Accessed: 13-Mar-2017].
 - [152] George Pichurov, P. Stankov, and D. Markov, “HVAC Control based on CFD analysis of room airflow,” 2006.
 - [153] M. Patel, “Computational Fluid Dynamics Analysis for HVAC Systems,” 2014. [Online]. Available: <http://www.hitechcfd.com/cfd-knowledgebase/computational-fluid-dynamics-analysis-for-hvac-systems.html>. [Accessed: 13-Mar-2017].
 - [154] “Thermal Fluid Analysis.” [Online]. Available: <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/thermal-fluid-analysis.htm>. [Accessed: 16-Mar-2017].
 - [155] F. Erdal, S. Shirazi, O. Shoham, and G. Kouba, “CFD Simulation of Single-Phase and Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators,” *SPE J.*, vol. 2, no. 4, pp. 436–446, 1997.
 - [156] M. K. Roul and S. K. Dash, “Numerical investigation of single phase and two phase flow through thin orifices in horizontal pipes,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 9, pp. 3274–3280, 2012.
 - [157] E. Stenmark, “On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software,” 2013.
 - [158] G. Eggenspieler, “Multiphase Models in ANSYS CFD,” pp. 1–49, 2012.
 - [159] M. Dular, T. Bajcar, L. Slemenik-Per??e, M. ??umer, and B. ??iok, “Numerical simulation and experimental study of non-Newtonian mixing flow with a free surface,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 473–486, 2006.
 - [160] G. R. Kasat, A. R. Khopkar, V. V. Ranade, and A. B. Pandit, “CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor,” *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 15, pp. 3877–3885, 2008.
 - [161] D. Wadnerkar, R. P. Utikar, M. O. Tade, and V. K. Pareek, “CFD simulation of solid-liquid stirred tanks,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 445–453, 2012.
 - [162] D. Kim, O. Song, and H.-S. Ko, “A practical simulation of dispersed bubble flow,” in *ACM Transactions on Graphics*, 2010, vol. 29, no. 4, p. 1.
 - [163] B. Wu, “CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters,” *Water Res.*, vol. 44, no. 13, pp. 3861–3874, 2010.
 - [164] R. G. Galdamez, S. Wood, S. Gokaltun, and D. Ph, “Numerical Simulations of Pulsed-Air Mixing Using Multiphase Computational Fluid Dynamics Methods domain is calculated as a weighted averaged of the volume fraction of the two fluids as,” p. 2011, 2011.
 - [165] N. Ratkovich, S. K. Majumder, and T. R. Bentzen, “Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas-liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 91, no. 6, pp. 988–998, 2013.

- [166] "ANSYS Fluids Applications." [Online]. Available: <http://www.ansys.com/Solutions/Solutions-by-Application/Fluids>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [167] "COMSOL Multiphysics." [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [168] C. Wollblad, "CFD in COMSOL Multiphysics," 2011.
- [169] "OpenFoam." [Online]. Available: <http://www.openfoam.com/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [170] E. Soto, C. Goujon, R. Zenit, and O. Manero, "A study of velocity discontinuity for single air bubbles rising in an associative polymer," *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 12, 2006.
- [171] I. FLUENT, "Modeling Turbulent Flows," 2006.
- [172] S. Wasserman, "Turbulence Model for Your CFD Simulation," 2016. [Online]. Available: <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>. [Accessed: 20-Aug-2017].

ANEXO A - DETERMINAÇÃO DO RAIOS DA BOLHA DE AR

Para determinar o raio da bolha, primeiro é necessário calcular o caudal volumétrico de ar.

$$Q = 11,1 \times S \times (P1 + 1,01325) \times \sqrt{\frac{273}{273 + T}}$$

Q- Caudal volumétrico (m³/s)

S- Área da secção transversal do tubo (m²)

P1 – Pressão (bar)

T- Temperatura (°C)

O tamanho da bolha em volume (*Vb*) é determinado pela expressão:

$$Vb = \frac{Q}{60 \times 0,1}$$

Sendo que o valor 0,1 corresponde ao Ton do Pulse Air em segundos.

Considerando o volume da bolha, o volume de uma esfera, é possível calcular o raio da bolha.

$$Vb = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Vb – Volume da bolha (mm³)

r – Raio da bolha (mm)